



Brint som energibærer (med fokus på ellagring). Statusrapport

Schleisner, L.; Nielsen, Lars Henrik; Pedersen, Allan Schrøder; Kjøller, J.

Publication date:
1991

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Schleisner, L., Nielsen, L. H., Pedersen, A. S., & Kjøller, J. (1991). *Brint som energibærer (med fokus på ellagring). Statusrapport*. Risø-M No. 2940

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Brint som energibærer (med fokus på ellagring)

Statusrapport

Lotte Schleisner, Lars Henrik Nielsen, Allan Schrøder Pedersen,
John Kjøller



Brint som energibærer (med fokus på ellagring)

Risø-M-2940

Statusrapport

**Lotte Schleisner, Lars Henrik Nielsen, Allan Schrøder Pedersen,
John Kjøller**

**Energisystemgruppen
Afdelingen for Systemanalyse
Forskningscenter Risø, Roskilde
Juni 1991**

Abstract.

Nærværende rapport er en statusrapport på projektet "brint som energibærer". Der er i rapporten specielt lagt vægt på udnyttelsen af brint som et lagringsmedium for el.

Rapporten har bl.a. behandlet teknikker vedrørende produktion, lagring, transport og anvendelse af brint. Beskrivelsen af de forskellige teknologier omhandler primært allerede demonstrerede teknologier.

Rapporten er baseret på litteraturstudier og i nogle tilfælde personlige oplysninger eller møder.

Statusrapporten er udført under EFP-90 under området udredninger og er en del af projektet "brint som energibærer" j.nr. 151/90-0030.

ISBN 87-550-1746-0

ISSN 0418-6435

Grafisk Service, Risø, 1991

INDHOLD	Side
FORORD	7
1. INDLEDNING	9
DEL I	
2. ELLAGRING MED BRINT SOM ENERGIBÆRER	11
2.1. Baggrund	11
2.2. Det analyserede ellagersystem	11
2.3. Energistrømme	15
2.3.1. Energiomsætninger i dag	15
2.3.2. Energiomsætninger i fremtiden	18
2.4. Økonomi for fremtidens system	21
2.4.1. Forudsat om priser på energiinput	21
2.4.2. Forudsat om ellagerets drift	21
2.4.3. Investeringer, drift og vedligeholdelse	22
2.4.4. Kalkulationsrente og beregningsperiode	24
2.4.5. Omkostninger pr kWh el leveret til lageret	24
2.5. Bemærkninger angående inputeffekt og døgnlagre	28
2.6. Afsluttende bemærkninger	29
DEL II	
3. INTRODUKTION AF BRINT SOM ENERGIBÆRER	31
4. DANSK BRINTRELATERET FORSKNING	33
5. BRINTRELATERET FORSKNING I UDLANDET	34
5.1. Udenlandske forskningsprojekter	37
6. PRODUKTION AF BRINT	43
6.1. Oversigt over produktionsformer	44
6.2. Elektrolyse	45
6.3. Økonomiske forhold	49
6.4. Sammenfatning i forhold til produktion af brint i Danmark	50

	Side
7. TRANSPORT AF BRINT	52
7.1. Transport i rørledninger	54
7.2. Sikkerhed i forbindelse med transport af brint	56
7.3. Økonomi	57
7.3.1. Energibalance	57
7.3.2. Økonomiske forhold	58
7.4. Sammenfatning i forhold til transport af brint i Danmark	59
8. LAGRING AF BRINT	60
8.1. Lagringsformer	60
8.1.1. Lagring af gasformig brint	60
8.1.2. Lagring af flydende brint	67
8.1.3. Lagring i fast form	68
8.1.4. Sammenligning af lagringsmetoderne	71
8.2. Sikkerhed i forbindelse med brintlagring	74
8.3. Økonomi	75
8.3.1. Energibalance	75
8.3.2. Økonomiske forhold	76
8.4. Sammenfatning i forhold til ellagring i Danmark	77
9. ANVENDELSE AF BRINT	79
9.1. Omdannelse af brint til elektricitet	80
9.1.1. Kraftvarmeprocesser	80
9.1.2. Elektrokemiske processer (brændselsceller)	81
9.1.3. Sammenligning af brændselscelletyperne .	85
9.1.4. Økonomiske forhold for brændselsceller .	86
9.2. Udnyttelse af brint til transportsektoren	87
9.3. Sammenfatning i forhold til anvendelse af brint i Danmark	88
10. SYSTEMER MED BRINT SOM ENERGIBÆRER	90
10.1. Teoretiske studier	90
10.2. Demonstrationsanlæg	93

	Side
11. VURDERING AF BRINTTEKNOLOGIENS FREMTID	98
11.1 Videre forskning og udvikling	100
12. KONKLUSION	102
12.1. Energieffektivitet	103
12.2. Økonomiske forhold	104
13. VIDERE PROJEKTFORLØB	106
REFERENCER	109
BILAG 1: Litteratursøgning	122

FORORD

Formålet med nærværende rapport er at beskrive de forskellige omdannelsesprocesser i et brintsystem, fra produktion via transport og lagring til anvendelse. Specielt er der blevet lagt vægt på energieffektiviteten ved de forskellige processer.

Der er i rapporten især tænkt på udnyttelsen af brint som energibærer i forbindelse med ellagring, og hovedformålet har således været at udregne en energieffektivitet ved benyttelsen af brint som ellager.

Beskrivelserne af de forskellige teknologier i rapporten omhandler primært allerede demonstrerede teknologier. I nogle tilfælde er teknologien dog endnu ikke afprøvet, og effektiviteterne må derfor betragtes som teoretiske estimater.

Rapporten er baseret på litteraturstudier og i nogle tilfælde også personlige oplysninger eller møder.

Rapporten er primært udarbejdet i Energisystemgruppen med bidrag fra Afdelingen for Materialeforskning. Således har Afdelingen for Materialeforskning stået for litteratursøgning samt kontakt til relevante firmaer, da afdelingen via sit arbejde gennem flere år indenfor brintlagring har såvel litteratur som kontakter på området. Derudover har Afdelingen for Materialeforskning i det væsentlige udarbejdet kapitlet vedrørende lagring. Følgende personer har deltaget ved udarbejdelsen af rapporten:

Lotte Schleisner	(Energisystemgruppen) projektleder
Lars Henrik Nielsen	(Energisystemgruppen)
Allan Schrøder Pedersen	(Afdelingen for Materialeforskning)
John Kjøller	(Afdelingen for Materialeforskning)

1. INDLEDNING

Første del af projektet "brint som energibærere" er afsluttet med nærværende rapport, der er en statusrapport baseret på litteraturstudier og besøg. Litteraturstudiet har især været baseret på artikler fra tidsskriftet "Journal of Hydrogen Energy" samt artikler fra konferencen "World Hydrogen Energy Conference" (en konference der bliver afholdt hver andet år). Derudover er der udvalgt diverse rapporter af interesse for projektet, jvf. referencelisten.

For at opfylde rapportens hovedformål (lagring af el i større skala) bærer de i rapporten behandlede teknologier præg af, at den primære energikilde er el såvel ved produktion som anvendelse af brint. Andre teknologier er dog berørt overfladisk.

Rapporten er delt op i 2 hoveddele. Del I udgør en redegørelse for effektiviteten ved benyttelse af brint i forbindelse med ellagring, set ud fra såvel et energimæssigt som økonomisk synspunkt. Der opstilles et brintsystem, hvor effektiviteten i dag og i fremtiden beregnes fra produktion via transport og lagring til anvendelse. Derudover udregnes økonomien for det tilsvarende system. Nøgletallene, der er benyttet i systemet, er ekstraheret fra de respektive kapitler i Del II.

Del II behandler i hovedtræk emnerne 1) Introduktion af brint som energibærere, 2) Produktion af brint, 3) Transport af brint, 4) Lagring af brint og 5) Anvendelse af brint. Et gennemgående forhold ved behandlingen af de respektive emner er, at brinten er tænkt udnyttet som et ellager under danske forhold, således at der gennem produktion af brint kan opnås en lastudjævning, således at egenproduktion og import af el kan optimeres energimæssigt og økonomisk i elsystemet. Hvert afsnit afsluttes med en sammenfatning, hvori der redegøres for, hvilke teknologier der hensigtsmæssigt kan benyttes i Danmark, og som derfor vil blive brugt i systemberegningerne.

Det er i rapporten blevet belyst, hvilke områder brintforskningen især har koncentreret sig om såvel i Danmark som i udlandet. På basis af dette samt de i rapporten behandlede teknologier er brintteknologiens fremtid søgt vurderet. Derudover er der på basis af referencer blevet påpeget områder for videre forskning og udvikling.

Da nærværende rapport kun behandler en første fase af projektet "brint som energibærer", er der slutteligt i rapporten blevet redegjort for planerne med det videre arbejde på projektet.

2. ELLAGRING MED BRINT SOM ENERGIBÆRER

(sammenfatning og beregninger)

2.1. Baggrund

Der er et velkendt behov for energilagring i stor skala i det eksisterende elsystem. Dette imødekommes i mange lande f.eks. ved vandpumpelagre. En fuld anvendelse af energilagre kan imidlertid kun ske ved udvikling af nye og mere bredt anvendelige lagringsteknologier (ref. 14).

Lastvariation over døgn, uge eller på årsbasis fremkalder et behov for lagring specielt i forbindelse med store kraftværkshenheder, der er designet til at operere ved maksimal effektivitet på basislast. Ligeledes har der vist sig et behov for ellagring i forbindelse med en stigende binding imellem el- og varmeproduktion på decentrale anlæg, samt i forbindelse med en større udnyttelse af varierende energikilder som sol, vind og bølgeenergi.

En typisk lastkurve vil vise stor efterspørgsel på mellem- og spidslasttidspunkter, hvilket kræver ekstra stor kapacitet. Den installerede kapacitet er således i så godt som alle lande det dobbelte af den gennemsnitlige last over året. Ved benyttelsen af storskala energilagre kan den relativt effektive og billige basislast opgraderes, og overskudsproduktionen ved ikke-spidslastperioder kan lagres. Ved afladning af lageret f.eks. i spidslastperioder kan kapaciteten på spidslastanlæg reduceres, og derudover vil det højere basislastniveau kunne erstatte en del af mellemlasten (ref. 14).

2.2. Det analyserede ellagersystem

Hovedformålet i det følgende er at undersøge, hvilken effektivitet et ellagersystem i dag og i fremtiden kan forventes at opnå, når brint anvendes som energibærer, og brintteknologi

udnytttes.

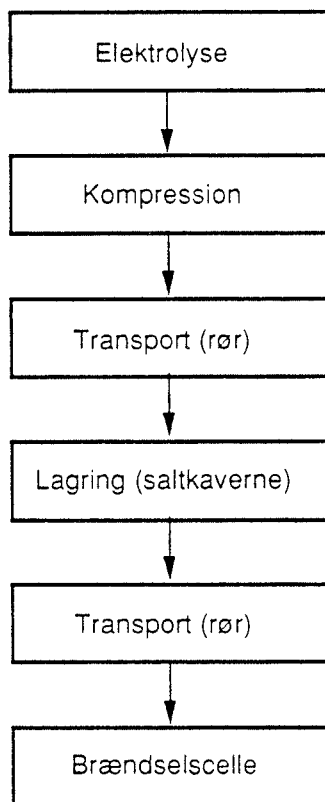
Energistrømmene for et sådant ellagersystem beskrives, som de kan se ud i dag. Desuden beskrives energistrømmene, som de kan forventes at blive i fremtiden. På denne baggrund samt forventninger til prisudviklingen for de enkelte komponenter i ellagersystemet vurderes omkostningerne pr. kWh el, der har passeret lageret.

Beregningerne er baseret på konklusioner fra det gennemførte litteraturstudie og på indhentede oplysninger fra eksperter på enkeltområder samt i nogle situationer også egne skøn. Datagrundlaget er beskrevet i rapportens kapitler 6-10. Centrale er rapportens kapitler 6, 8 og 9 angående henholdsvis produktion af brint, lagring af brint og anvendelse af brint. De benyttede data for elektrolyse og brændselsceller i fremtiden udgør udbredte forventninger til udviklingen på 10-15 års sigt. Lagring af brint i saltkaverner er en kendt og anvendt teknologi i dag.

Det analyserede system for ellagring er sammensat af en elektrolyseenhed, et lager for brint, som er en kaverne udskyllet i en salthorst, samt en brændselscelleenhed, som vist på figur 2.1.

I korthed kan samspillet mellem komponenterne beskrives på følgende måde:

Elektricitet sønderdeler vand i elektrolysøren til brint og ilt. Energitalet genfindes som varme. Alene brinten forudsættes her at gå videre til lagring. (Ilten benyttes ikke i det analyserede system.) Brinten komprimeres, køles og ledes til lageret. Da det er store brintmængder, det drejer sig om, forudsættes brinten lagret i kaverner. Kaverner i salthorste er, som det fremgår af kapitel 8, den teknisk og økonomisk bedste mulighed som lager for tryksat brint i større mængder. Brint hentes fra lageret, ekspanderes og omsættes til elektricitet og varme i brændselsceller, hvorefter lagercyklen er sluttet.



Figur 2.1. Det analyserede brintsystem

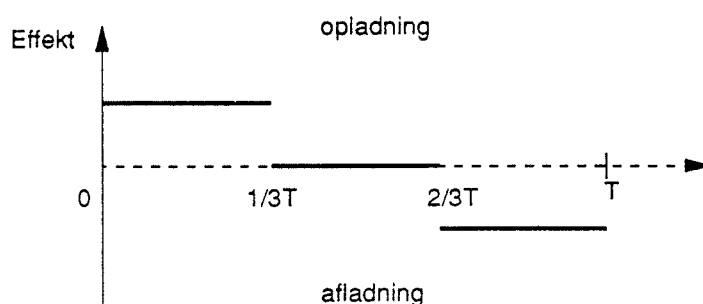
Systemets dele kunne i praksis være placeret adskilt og udveksle brint gennem rørledninger. I det følgende forudsættes alle faser at foregå på samme lokalitet, og transmission af brint og elektricitet samt varme er derfor ladt ude af billedet.

Mere konkrete analyser af indpasningsmulighederne i det øvrige kraftvarmesystem vil naturligvis omfatte overvejelser angående bindinger til lagerets placering, afsætningsmuligheder for varmeproduktionen, elnetsforhold m.v. samt eventuelle andre fordele ved placering af komponentdele på allerede eksisterende kraftværker.

Kapaciteten på systemets inputside antages at være 100 MW el. Denne forudsætning er dog mindre væsentlig for de relative energistrømme, idet beskrivelsesniveauet i de udførte beregninger ikke går detaljeret ind i en dimensionering.

Tilsvarende har de nedenfor beskrevne forudsætninger om benyttelsestider for lagerets op- og afladningsfaser ikke indflydelse på de beregnede systemeffektiviteter, men benyttelsestiderne er væsentlige for effektdimensionering på afladningssiden og kravene til brintlagerets størrelse.

Opladningsfasen, hvilefasen og afladningsfasen for lageret er i dette regneeksempel sat til hver $1/3$ af lagercyklens tidsperiode T ved maksimal effekt på op- og afladningssiden. Dette er kvalitativt vist som effektvarighedskurven på figur 2.2.



Figur 2.2. Forudsatte benyttelsestider ved maksimal effekt til og fra lageret

Systemets elektrolyse- og brændselscelledel vil ikke arbejde samtidig, men effektvarighedsforløb for disse komponenter kan godt dække hele cyklens periode T . Lageret er da aktivt over hele perioden.

Der ses i det følgende på en lagercyklus med varigheden 1 år, d.v.s. et sæsonlager.

Dersom en cyklus for lageret var et døgn, ville kravet til brintlagerets volumen tilsvarende falde og dermed også omkostningerne til udvaskning af kavernens volumen. Med uændrede effektforhold vil den meget væsentlige del af lageromkostningerne (skønsmæssigt ca. $2/3$), der er effektbestemte, ikke være berørt af en ændret cyklusperiode. Energipassagen på årsbasis

gennem lageret er ligeledes uændret.

Selv om lageret er dimensioneret til en periode på et år, vil systemet også give fordele på cykler med kortere varighed, eksempelvis med perioden et døgn.

2.3. Energistrømme

2.3.1. Energiomsætninger i dag

De energi- og effektmæssige forudsætninger for systemets tre væsentlige komponentdele er vist i tabel 2.1.

Tabel 2.1. Virkningsgrader i dag samt effekt og årlig energiomsætning for systemets 3 koblede hovedkomponenter

I dag	Elektrolyse	H ₂ -lager	Brændselscelle
Effektivitet Ud/ind	91%	99%	60%
Kapacitet (maks. dim.input)	100 MW el	91 MW H ₂	90 MW H ₂
Benyttelsestid ved maks. kapacitet i timer/år			
Opladning	2920	2920	-
Afladning	-	2920	2920
Årlig energiinput	292 GWh	266 GWh	263 GWh

Ud fra effektiviteterne vist i tabel 2.1, samt yderligere forudsætninger som beskrevet nedenfor, kan energistrømmen i det samlede system opstilles som vist på figur 2.3.

På figur 2.3 er tilgangen af energi til systemet (elektricitet) normeret og sat til 100%, som angivet øverst på figuren. Energiomsætningen igennem systemets elektrolysedel, lager og brændselscelledel er vist som successive forløb ned gennem figuren.

Den mørke nedadgående strøm på figuren udtrykker de relative energimængder af el eller H_2 , der passerer igennem de enkelte led i systemets kæde. Efter passage af elektrolysedelen er energibæreren brint, på nær den del el, som i energikaskaden anvendes eller genvindes i forbindelse med komprimering og dekomprimering af brinten.

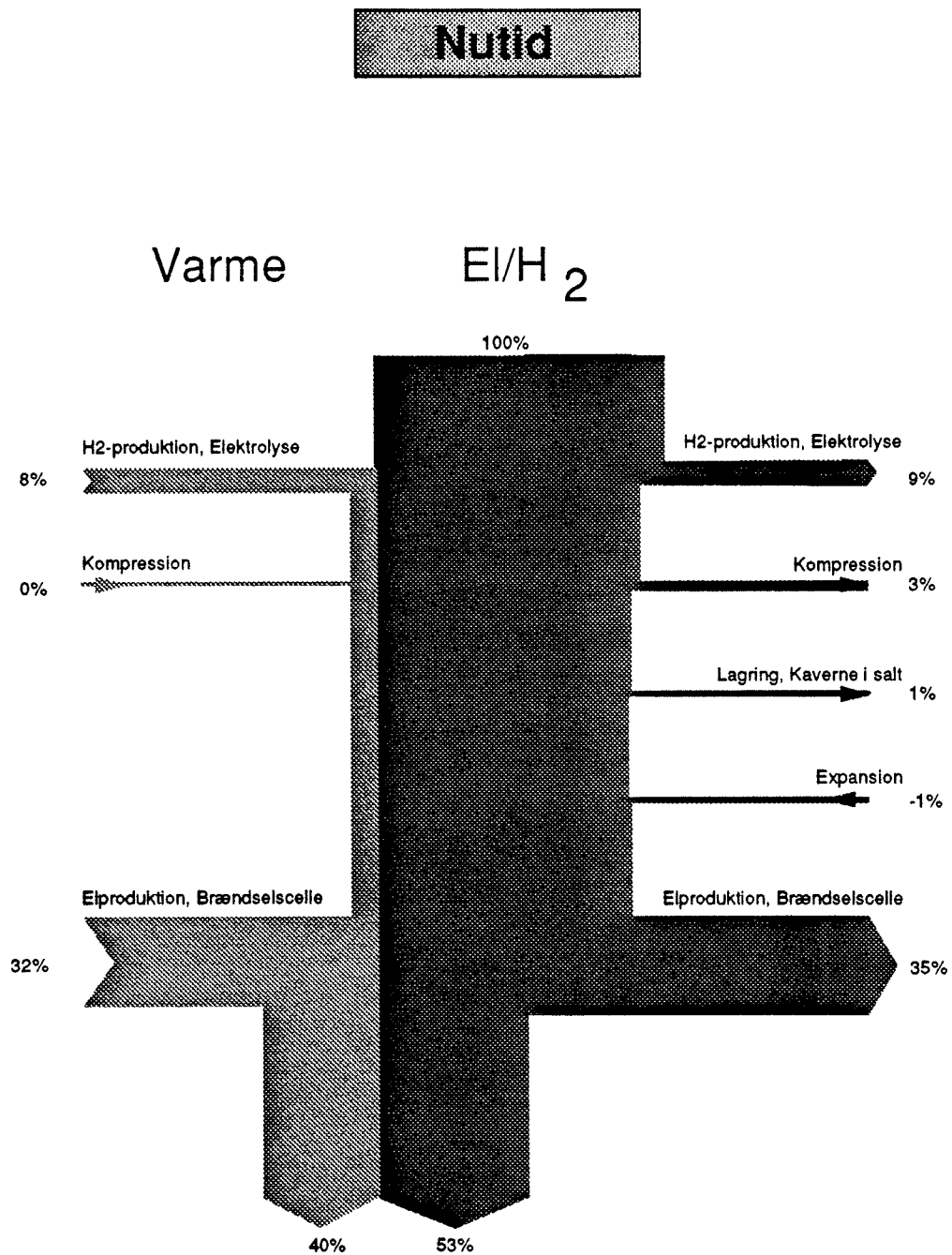
Efter passage af brændselscellen nederst på figuren er energibæreren atter elektricitet.

Udgående strømme mod højre udtrykker energitab ved den pågældende proces. Den del af energitabet, der forventes at have et temperaturniveau, der kan udnyttes til opvarmningsformål (eller evt. kunne danne grundlag for yderligere elproduktion), er vist som en indkommende strøm fra venstre på figuren. De akkumulerede varmemængder er vist som en nedadgående strøm i lighed med energistrømmen for el/ H_2 .

Det er antaget, at 90% af varmetabet ved elektrolyse og i forbindelse med omsætning af brint i brændselscellen vil være en potentiel varmekilde til fjernvarme m.v.

Som det ses af figuren, er systemets samlede elvirkningsgrad ca. 53%. Dette er som nævnt baseret på teknologiernes virkningsgrader, som de kendes i dag. Det led i kæden, der giver det største tab, er brændselscelledelen, hvor 35% af systemets samlede elinput omsættes til varme.

I forbindelse med kompression af brint til lagerets arbejdstryk kan tab i form af varme ved relativt høje temperaturer eventuelt udnyttes, men det forudsættes her, at kompressionsvarme går tabt.



Figur 2.3. Energisætning i dag for ellagersystem baseret på brintteknologi

Brintkompression er standardteknologi, men har dog relativt lav effektivitet (ref. 16). Kompressorer har ofte problemer omkring brintskørhed i materialerne, samt en tendens til lækage i rørsammenføjninger. Det er derfor væsentligt, at komponentvalget er nøje afstemt efter driftsbetingelserne for det aktuelle anlæg.

Ved komprimering af brint med en faktor 10 medgår et energiforbrug svarende til ca. 3,1% af brintens høje brændværdi. Denne logaritmiske skalering af elforbruget ved komprimering af brinten er anvendt her. Som vist på figur 2.3 medfører dette et tab på ca. 3% af den samlede tilførte elektricitet til vort system.

Under afladning af lageret dekomprimeres brinten til det trykniveau, som brændselscellen arbejder under. Det er skønsmæssigt antaget, at der ved dekomprimeringen kan genvindes ca. 1/3 af kompressionsarbejdet før lagringen i form af elektricitet ved ekspansion af brinten i en turbine. På figur 2.3 er denne antagelse vist som et tab på -1% el.

Brintlagerets virkningsgrad er sat til 99%. Som beskrevet i afsnit 8.1.1 kan saltkaverner i en salthorst forventes at være nær tabsfrie, men i beregningerne er det antaget, at 1% af brintmængden, der har passeret igennem lageret, tabes ved lækager, diffusion m.v.

Systemets varmeoutput, som tidsmæssigt især er styret af brændselscellens drift, udgør ca. 40% af elforbruget på input-siden. Adderes hertil virkningsgraden på el-siden, fås en samlet el+varmeudnyttelse på 93% for den lagrede elektricitet.

2.3.2. Energiomsætningen i fremtiden

For fremtidige anlæg på ca. 10-15 års sigt forventes effektiviteten for systemets hovedkomponenter som vist i tabel 2.2.

Tabel 2.2. Forudsatte fremtidige virkningsgrader samt effekt og årlig energiomsætning for systemets 3 koblede hovedkomponenter

Fremtid	Elektrolyse	H ₂ -lager	Brændselscelle
Effektivitet Ud/ind	94%	99%	65%
Kapacitet (maks. dim.input)	100 MW el	94 MW H ₂	93 MW H ₂
Benyttelsestid ved maks. kapacitet i timer/år			
Opladning	2920	2920	-
Afladning	-	2920	2920
Årlig energiinput	292 GWh	274 GWh	272 GWh

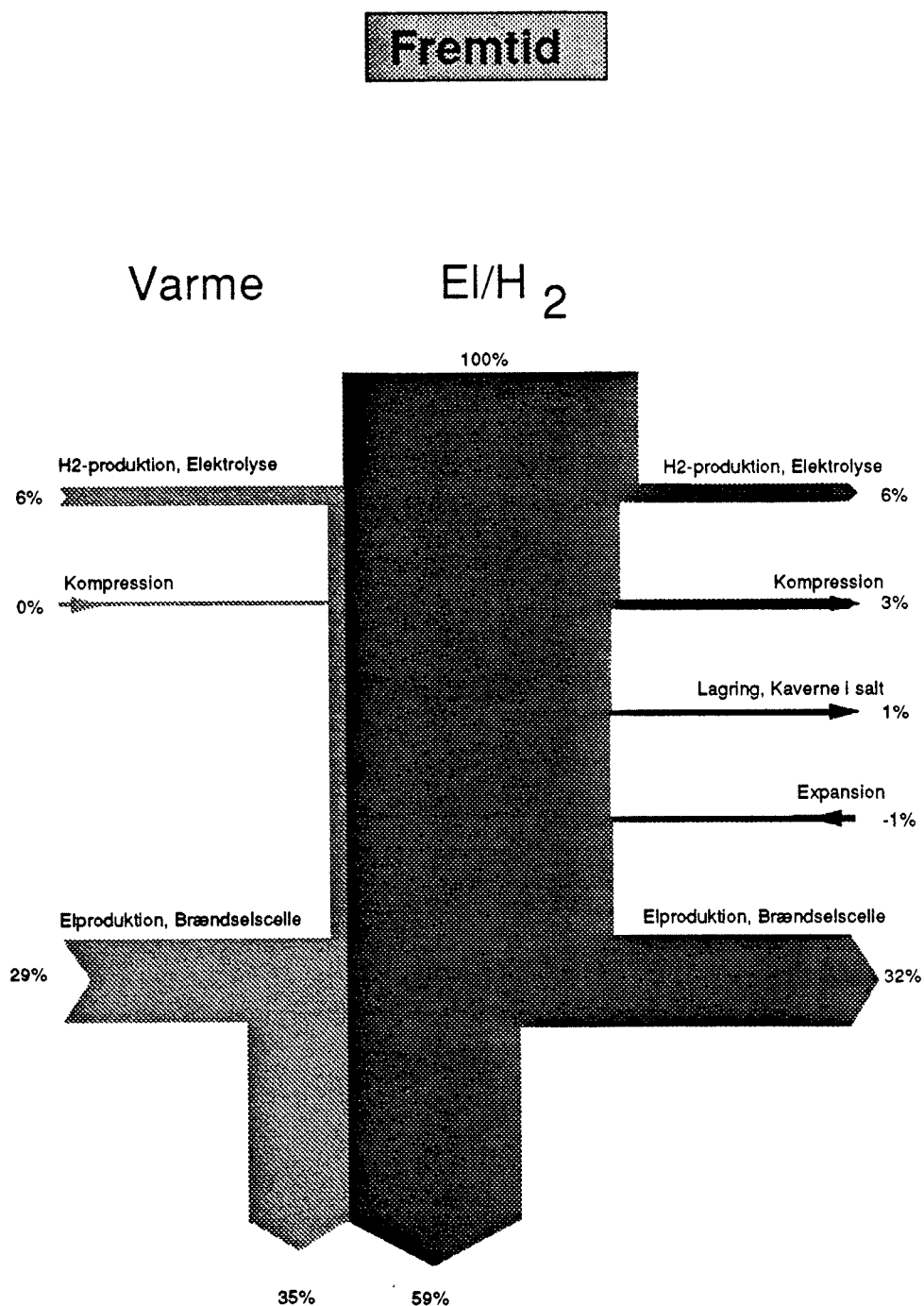
Virkningsgraden for elektrolyseanlæg og brændselsceller forventes at kunne øges i fremtiden til henholdsvis 94% og 65%, mens selve brintlagerets effektivitet fortsat antages at være 99%.

De tidligere beskrevne forudsætninger for anlæg i dag omkring kompression, ekspansion og varmeudnyttelse er ikke ændret ved beregninger på fremtidige anlæg.

Energistrømmene gennem et fremtidigt anlæg forventes på denne baggrund at være som vist på figur 2.4.

Systemets virkningsgrad som ellers alene forventes at ligge på omkring 59%. På varmesiden forventes et fjernvarmepotentiale på 35% af den tilførte elektricitets energiindhold. Ved en udnyttelse af såvel el som varme fra systemet fås en samlet virkningsgrad på 94%.

Som nævnt i indledningen er det antaget, at alle komponenter i systemet ligger placeret samlet (nær en salthorst!), hvorfor transmissionstab for rørført brint og varme foruden eventuelle transmissionstab på elsiden er ladet ude af beregningerne.



Figur 2.4. Forventet energiomsætning i fremtidigt ellagersystem baseret på brintteknologi

2.4. Økonomi for fremtidens system

Det følgende beskriver et regneeksempel, der kan illustrere størrelsesordenen af meromkostningerne pr. kWh elektricitet (input) leveret til ellagersystemet. En kWh elektricitet leveret til lagersystemet genfindes efter lagring som 0,35 kWh varme og 0,59 kWh elektricitet (se figur 2.4). Udgangspunktet er som før en dimensioneret inputeffekt på 100 MW el til systemet.

2.4.1. Forudsat om priser på energiinput

De beregnede meromkostninger pr. kWh el input til ellagersystemet inkluderer investeringer og omkostninger til drift og vedligeholdelse, men ikke omkostninger til elektricitetsforbruget i systemets elektrolysedel og ej heller energiomkostninger til de øvrige energiinput til kæden af teknologier, der udgør ellagerenheden. Det er således forudsat, at alle energiinput til lagersystemet har prisen nul.

Når totalprisen pr. kWh el leveret fra ellageret ønskes beregnet, skal omkostningerne til energiinput adderes til de beregnede meromkostninger pr. kWh el input til ellageret. Disse samlede omkostninger pr. kWh input, fratrasket værdien af den producerede varme på 0,35 kWh m.v., skal sættes i relation til et eloutput fra lageret på 0,59 kWh el.

2.4.2. Forudsat om ellagerets drift

I det aktuelle regneeksempel er det forudsat, at lageret gennemløber netop én op- og afladningscyklus pr. år. Brintlageret skal derfor være dimensioneret til at rumme en energimængde svarende til hele nettoopladningen gennem en årscyklus, hvilket stiller meget store krav til brintlagerets volumen.

En cyklusperiode på et år har som nævnt en opladningsfase, der antages at dække $1/3$ af cyklusperioden, d.v.s. 2920 timer/år

defineret ved maksimal inputeffekt. Det samme antal timer er forudsat om afladningsperioden ved maksimal outputeffekt, hvorfor hviletiden for lageret tilsvarende er $1/3$ af cyklusperioden. Ved drift med lavere effekt end installeret maksimum kan op- og afladningsperioderne tilsammen dække hele cyklusperioden - men aldrig mere, idet tidssammenfald for op- og afladning gør et ellager overflødigt.

De ovenfor nævnte forudsætninger er væsentlige for dimensionering af anlægget. På inputsiden, elektrolyseenheden, er der som udgangspunkt forudsat en installeret effekt på 100 MW, men hvad angår størrelsen af selve brintlageret og den installerede effekt på kädens sidste led, brændselscellen, kræves forudsætninger om antallet af cykler pr. år, op- og afladningsfaser indenfor en cyklus inkl. forudsætninger om effektbehov på outputsiden.

Investeringer og omkostninger til drift og vedligeholdelse for brintlageret afhænger af antallet af lagercykler pr. år og benyttelsestider indenfor en cyklus samt effektiviteten på elektrolyseenheden.

Effektbehovet på outputsiden af ellagersystemet er afgørende for investering og omkostninger til drift og vedligeholdelse for brændselscelledelen. Øges den maksimale installerede effekt på outputsiden, falder benyttelsestiden for afladningsfasen tilsvarende, så den årligt omsatte energi er uændret.

Ved lige store benyttelsestider for op- og afladning vil de relative installerede effekter i systemet svare til de normerede energistrømme vist på figur 2.4.

2.4.3. Investeringer, drift og vedligeholdelse

Baggrunden for de anvendte data er beskrevet i de respektive kapitler senere i rapporten. Disse kapitler afsluttes med angivelse af de data, der ligger til grund for beregningerne.

Hovedtallene er vist i tabel 2.3.

Tabel 2.3. Forventede fremtidige specifikke investeringer samt årlige omkostninger til drift og vedligeholdelse

	Elektrolyse	Saltkaverne	Brændselscelle
Investering	2020 kkr./MW el	300 kr./m ³	5400 kkr./MW el
Økonomisk levetid	20 år	30 år	10 år
Drift og vedligeholdelse			
% af investering pr. år	10,3	1,6	7,5
(udtrykt i kkr./GWh input	26	14	30)
Investering i basisgas		0 kr.	
Prisniveau: ca. 1990-priser			

Baseret på tallene i tabel 2.3 er investeringer og årlige omkostninger til drift og vedligeholdelse skaleret til at gælde ellagersystemet med 100 MW installeret effekt på inputsiden.

Tallene, der er anvendt for brintlagring i en saltkaverne, er baseret på relativt grove forudsætninger. Brintlageret, der her antages at være et tørt tryksat gaslager uden brinekompenseret drift, vil på grund af krav til trykstyring af lageret for at sikre kavernens stabilitet, indeholde en basisgasmængde af brint, som skal tages med i investeringen. Mængden af brint, der initielt er tabt på denne måde, afhænger af lagerets størrelse, driftsform m.v. og vil være af samme størrelsesorden som lagerets arbejdsindhold af brint. Denne initialomkostning er ikke inddraget i beregningerne direkte, da det som nævnt er forudsat, at priser på inputenergi er sat til nul.

Omkostninger til basisgas andrager ca. 5% af prisen på inputelektricitet under opladning for sæsonlagre.

Var lageret valgt som et brinekompenseret lager med konstant tryk og variabelt volumen over brinen, kunne lageret aflades

helt, og der ville ikke være omkostninger til basisgas. Muligheder for brinekompenseret drift er ikke søgt vurderet videre her.

2.4.4. Kalkulationsrente og beregningsperiode

Som forudsætninger for de økonomiske beregninger er valgt en beregningsperiode på 20 år og en real kalkulationsrente på 5% p.a.

De årlige kapitalomkostninger for elektrolyse- og brændselscelledelen i systemet er beregnet ud fra initialinvesteringen ved annuisering over beregningsperioden. For saltkavernens vedkommende er der forudsat en økonomisk levetid på 30 år, og årlige kapitalomkostninger er fremkommet ved annuisering af initialinvesteringen over 30 år. Den tekniske levetid for en saltkaverne til brintlagring kan være betydeligt længere, men vil naturligvis afhænge af driftsbetingelserne.

Levetiden for elektrolysøren er sat til 20 år, og levetiden for brændselscelledelen er sat til 10 år.

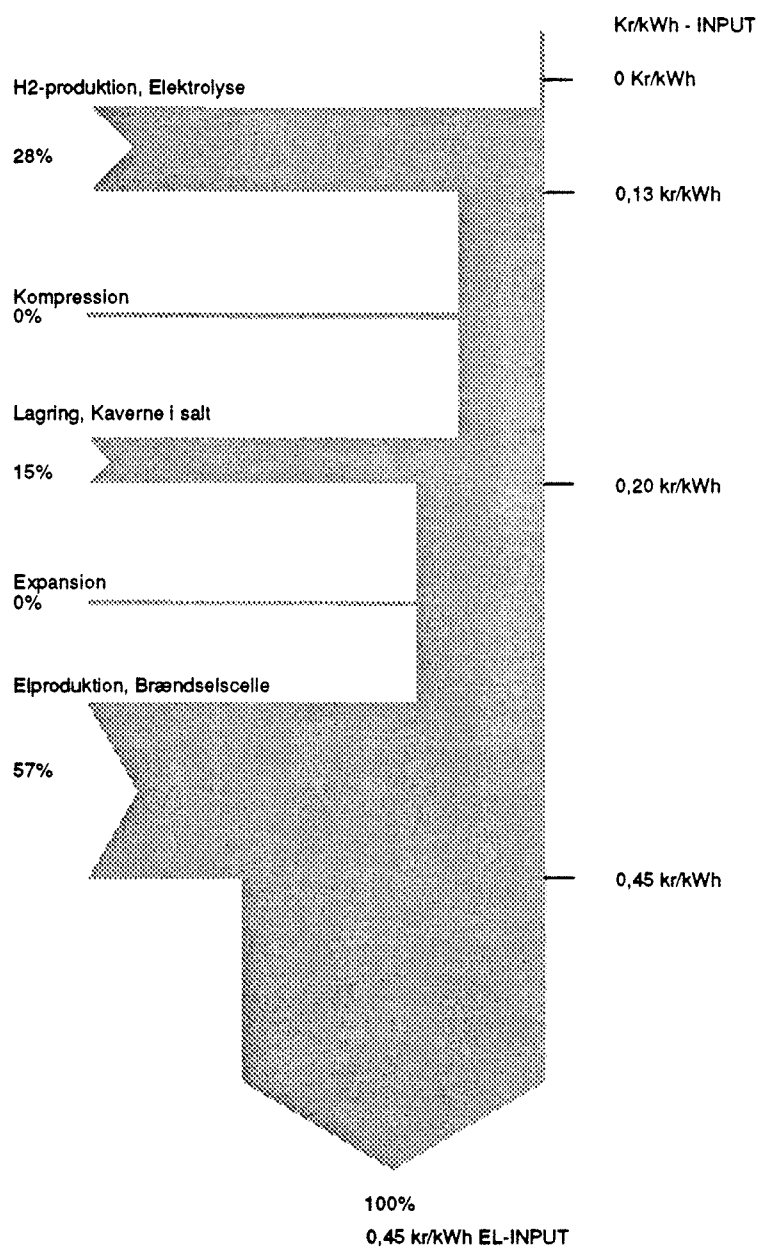
2.4.5. Omkostninger pr. kWh el leveret til lageret

Omkostningerne for ellagersystemet som helhed udtrykt pr. kWh elektricitet leveret til systemet, eksklusiv omkostninger til energiinput, er vist på figur 2.5.

Tallene på figuren er fremkommet ved division af de årlige omkostninger med den årlige tilgang af elektricitet til ellagersystemet. Priser vist på figur 2.5 dækker således både elleverancen og den potentielle fjernvarmeleverance fra ellagersystemet (ekskl. omkostninger for 1 kWh elinput til systemet). Produktion af den overskydende ilt ved elektrolyseprocessen er ligeledes indeholdt i priserne vist på figur 2.5.

Fremtid

Økonomi



Figur2.5. Omkostninger pr. kWh el leveret til lageret

Der leveres ca. 0,59 kWh elektricitet og ca. 0,35 kWh varme på outputsiden for hver kWh el forbrugt på inputsiden (se figur 2.4). Omkostningerne for denne energileverance fra lageret er meromkostningerne vist på figur 2.5 med tillæg af værdien af 1 kWh elektricitet i opladningsfasen. Herudover skal tillægges et mindre beløb pr. kWh el til den initielle investering i basisgas.

Af figur 2.4 og 2.5 fremgår således, at (mer)omkostningerne for at trække 1 kWh el fra sæsonlageret på tidspunkter af året, hvor elbehovet er stort, er ca. 0,76 kr./kWh el, når elleverancen bærer alle omkostningerne. Denne omkostning er fordelt på ellagersystemets hovedkomponenter med ca. 28% til produktion af brint og ilt samt varme fra elektricitet i elektrolyseenheden, ca. 15% til lagring af brinten inkl. kompression m.v., og ca. 57% af omkostningerne er forbundet med produktion af el samt varme i systemets brændselscelleenhed.

Antages som et regneeksempel, at den marginale elpris i fremtiden, på de tidspunkter af året hvor elektriciteten lagres, ligger på 0,10 kr./kWh, så vil omkostningerne til elinput til ellageret udgøre ca. 0,17 kr./kWh elektricitet leveret fra ellageret, når der forventes en årseffektivitet på ca. 59% for elsidens af systemet (se figur 2.4). Den samlede pris pr. kWh el hentet fra lageret bliver derfor i denne situation ca. 0,93 kr./kWh (ekskl. basisgasomkostninger og værdien af varmeproduktionen m.v.).

Denne elpris kunne herefter sammenholdes med det øvrige fremtidige elforsyningssystem's marginale produktionspris pr. kWh el på tidspunkter af året, hvor efterspørgslen er stor.

Dertil kommer, at der i denne beregning ikke er søgt inddraget eventuelle besparelser i det samlede kraftvarmesystem, der kunne følge af at indføre et brintlager og total set en el-lagerenhet. Det kan forventes, at en sådan enhed vil kunne substituere installeret effekt andre steder i systemet.

Beregningsresultaterne for brændselscellen vist på figur 2.5 er baseret på data bl.a. fra ref. 31 og ligger generelt set på niveau med forudsætninger beskrevet i Energi 2000, når forskelle omkring levetiden m.v. tages i betragtning.

I ref. 106 nævnes en forventet investering på $500 \text{ \$}/\text{kW}_{\text{el}}$ for kommercielle SOFC i slutningen af 1990'erne. Antages det, at selve brændselscellestakken vil have en levetid på omkring 40.000 driftstimer, og at levetiden iøvrigt er 20 år, samt at de årlige omkostninger til drift og vedligeholdelse uændret sættes til 7,5% af investeringen, fås omkostninger til systemets brændselscelledel, der er ca. halvdelen af det viste tal på figur 2.5 - d.v.s. ca. $0,13 \text{ kr.}/\text{kW}_{\text{el}}$ input til ellager-systemet.

Under mindre veldefinerede forudsætninger nævnes i ref. 20 et betydeligt lavere tal for masseproducerende brændselsceller på omkring $350 \text{ \$}/\text{kW}$. Muligheden for at udnytte reversible elektrolysører/brændselsceller kan forventes at medføre reducerede kapitalomkostninger, men dette samt effektiviteter, levetider m.v. for reversible celler er ikke undersøgt her.

De viste tal må betegnes som foreløbige. Der ligger mange forudsætninger til grund, hvoraf flere kan siges at være behæftet med betydelig usikkerhed. Desuden ligger der meget simplificerede forudsætninger til grund for ellagerets driftsbetingelser og systemindpasning. Tallene skal alene antyde, hvilke størrelsesorden der kan være tale om for et ellagersystem som dette baseret på brintteknologi.

For at indskrænke usikkerhederne på resultaterne skal data-siden analyseres mere indgående, og tilsvarende skal gyldighedsområder for skalering af investeringer m.v. undersøges tættere. Desuden skal det øvrige kraftvarmesystem, som ellagerenheden indgår i, konkretiseres bl.a. omkring benyttelsestider, eventuelle muligheder for effektsubstitution på mellem- og spidslastniveau m.v.

2.5. Bemærkninger angående inputeffekt og døgnlagre

Som nævnt har udgangspunktet for elkapaciteten på inputsiden været 100 MW. Havde udgangspunktet været eksempelvis det halve, 50 MW, ville dette ikke under de tilsvarende forudsætninger ændre de relative energistrømme, som vist på figur 2.4.

Behovet for sæsonlagerkapacitet for brint ville halveres, svarende til et kavernevolumen i samme størrelsesorden som en kaverneenhed i Lille Thorup (ca. 400.000 m³). Omkostningsmønstret for ellagersystemet som helhed pr. kWh elinput forventes uændret som vist på figur 2.5.

Beregningerne har taget udgangspunkt i sæsonlagring af elektriciteten, med brint som energibærere. Store sæsonlagre kan naturligvis også samtidig give fordele ved at fungere som døgnlager og lager for variationer på eksempelvis uge- og månedsbasis.

Sæsonlagre betyder store brintlagre, volumenmæssigt, i forhold til eksempelvis volumenbehov for døgnlagre. Et døgnlager vil være nedskaleret i volumen, svarende til at opladetiden pr. cyklus ved dimensioneret effekt i vor situation nu kun er 8 timer mod før 2920 timer.

Dette vil reducere omkostningerne i forbindelse med kavernens volumen meget betydeligt, men kapaciteter i systemet vil være uændret. Løst skønnet forventes ca. 1/3 af investeringen i brintlagre at skalere med det udskyllede volumen i kaverne.

På årsbasis, med de samme relative forhold mellem benyttelsestider for opladnings-, hvile- og afladningsfaser fordelt med 1/3 til hver, vil energipassagen gennem et døgnlager og sæsonlager være den samme.

Som nævnt i kapitel 8, kan andre lagertyper komme på tale, hvis behovet for at lagre brint bliver væsentligt mindre end forudsat her.

2.6. Afsluttende bemærkninger

Samme benyttelsestid for opladningssiden som for afladningssiden vil betyde effektkrav til komponenter proportionale med energiomsætningen, som vist på figur 2.4.

I praksis vil dette ikke nødvendigvis være en optimal dimensionering af komponenterne. Det kunne eksempelvis vise sig ønskeligt at have højere effektværdi på afladningssiden. Lageret, der giver en tidslig dekobling af produktionen, giver ligeledes en delvis effektmæssig dekobling. En høj installeret effekt på afladningssiden med tilsvarende reduktion i benyttelsestiden er en mulighed med den her forudsatte (ikke integrerede) komponentsammensætning. Relevansen heraf vil naturligvis afhænge af effektomkostninger i elsystemet som helhed, og effektdimensioneringen for brintlagerets drift spiller sammen med dette.

En mere konkret udførelse af en ellagerfacilitet, som diskuteret her, vil inkludere overvejelser om, hvor det kan være optimalt at placere de enkelte systemkomponenter, og for modulare komponenters vedkommende, om hvorvidt det kan være hensigtsmæssigt at opdele i flere moduler evt. placeret separat.

Da selve brintlageret (her en saltkaverne) kun har få placeringsmuligheder, skal omkostningsforhold og tekniske forhold for transmission af brint i rørledninger tillige undersøges. I udlandet er der mange års erfaring med rørført transport af brint (se kapitel 7), og dette er kendt teknologi.

Direkte samdriftsfordele med eksisterende kraftværker kan sammenholdes med omkostninger ved evt. rørført transport af brint til og fra brintlageret. Som berørt i kapitel 9 kunne HOS-teknologien (Hydrogen/Oxygen Spinning reserve), som bl.a. beskrevet i (28), måske komme til at spille en rolle i denne sammenhæng. Desuden skal højtemperaturvarme fra brændselsceller udnyttes til kraft- og varmeproduktion evt. på et eksisterende værk.

På varmesiden kan man tænke sig en tilsvarende problematik, hvor det kan overvejes, om fjernvarmetransmission til forbrugsstedet evt. skulle undgås, hvis brint i stedet kunne transporteres mere fordelagtigt. Energiomsætning med varmeproduktion kunne da eventuelt placeres, hvor varmebehovet lå.

3. INTRODUKTION AF BRINT SOM ENERGIBÆRER

Brint betragtes generelt som en kommende energibærer og lagringsmedie for det næste århundrede (ref. 14). Brint kan udvindes fra vand ved udnyttelse af enhver form for primær kilde af højkvalitetsenergi. Brint kan forbrændes til vand igen i en kemisk lukket cyklus uden emissioner.

Som det vises i rapporten, er en af fordelene ved benyttelsen af brint som energibærer, at rørtransmission over meget lange afstande er billigere og mere miljøvenlig end eldistribution.

Brint er ligesom elektricitet en sekundær energibærer, der kræver tilstedeværelsen af en energikilde for at kunne produceres. Brint og elektricitet er derudover absolut forenelige energisystemer, idet el kan benyttes til at producere brint gennem elektrolyse, mens brint sammen med ilt (luft) kan producere elektricitet bl.a. ved benyttelse af brændselsceller.

El har imidlertid den store ulempe ikke at kunne lagres. Dette betyder, at produktions- og transportsystemerne bestemmes af den maksimale efterspørgsel over året (ref. 8). Da der imidlertid er forskel i efterspørgsel dag og nat, sommer og vinter, er den gennemsnitlige efterspørgsel kun det halve af peak-efterspørgslen. Dette betyder, at alt udstyret i gennemsnit kun arbejder ved halv kapacitet, hvilket er et alvorligt problem set ud fra et økonomisk synspunkt.

Derudover er transport af el meget kostbart på grund af ledningstab, og derfor transporteres elektricitet oftest kun 100 km. Brint kan transporteres i rør ligesom naturgas over store afstande og til nogenlunde samme omkostninger.

Brint og el forventes at blive de dominerende energibærere i det fremtidige energisystem (ref. 16). Brint har imidlertid den fordel i forhold til el, at den kan lagres også i store mængder.

Af andre fordele ved udnyttelsen af brint kan nævnes:

- Alle primære energikilder kan benyttes ved produktion af brint.
- Ved at benytte brint som brændsel kan de individuelle lande blive uafhængige af udenlandsk olie. Energi fra forbrænding af affald kan også benyttes ved produktion af brint.
- Brint udgør en bedre udnyttelse af ressourcerne. I reference 7 er fundet følgende regneeksempel til illustration af brints effektivitet som drivstof i transportform:

1 ton kul - konverteret til benzin	- kan transportere en bus 440 mil.
1 ton kul - konverteret til el	- kan transportere en bus 480 mil.
1 ton kul - konverteret til methanol	- kan transportere en bus 520 mil.
1 ton kul - konverteret til brint	- kan transportere en bus 640 mil.

- Set ud fra et miljømæssigt synspunkt er anvendelse af brint i sig selv meget attraktiv. Når brint forbrændes ved tilførsel af luftens ilt, dannes der vanddampe. Nitrogenoxider dannes dog ved meget høje forbrændingstemperaturer (2000°C) (ref. 7).

I dag koncentrerer forskningen om en nedsættelse af energiforbruget bl.a. ved mere effektiv udnyttelse af traditionelle energikilder og om udvikling af vedvarende energikilder og nye energiteknologier. Fremtidens energikilde må være vedvarende, økonomisk attraktiv, driftssikker og transportabel. Langt fra alle de vedvarende energikilder kan opfylde disse betingelser. Brint kan imidlertid påpeges som den energibærer, der imødekommer disse kvaliteter bedst.

Brint er en fleksibel energibærer, der kan forene forskellige energikilder og -teknologier, som ellers er vanskeligt forenelige.

4. DANSK BRINTRELATERET FORSKNING

I Danmark har der igennem 80'erne været udført en del arbejde på Risø med reaktionen mellem brint og metaller, støttet af Energiministeriet. Arbejdet har været gennemført dels som egne aktiviteter og dels som samarbejdsprojekter, især med Norsk Hydro og Instituttet for Energiteknik i Kjeller, Norge. Arbejdet stoppede eksperimentelt omkring 1988, da der ikke mere kunne opnås EFP-støtte til arbejdet. Indsatsen har givet anledning til løbende deltagelse i konferencer om brintenergi generelt og metalhydrider specielt og har derigennem også givet anledning til etablering af kontakter til en række af de forskningslaboratorier, hvor der internationalt arbejdes med brint og metalhydrider. Gruppen på Risø er stadig omtrent intakt, men er nu overvejende beskæftiget indenfor andre grene af materialevidenskaben.

Resultaterne af Risøs brintarbejde er beskrevet i en længere række publikationer i såvel danske som internationale, faglige tidsskrifter, og en væsentlig del er yderligere beskrevet i Risø-rapporter.

Der findes således i Danmark en stor viden og erfaring om håndtering af brint særligt med udgangspunkt i metal-brint-systemer. Arbejdet er beskrevet mere detaljeret under kapitel 8.1.3 "Lagring i fast form".

Derudover er der i Danmark startet en storstilet indsats for at udvikle en avanceret fastoxid-brændselscelle. Udviklingsarbejdet er et samarbejde mellem Forskningscenter Risø, Haldor Topsøe A/S, Innovision A/S, Odense Universitet og Danmarks Tekniske Højskole. Dette projekt er omtalt i kapitel 9.1.2 Elektrokemiske processer (brændselsceller).

5. BRINTRELATERET FORSKNING I UDLANDET

En russisk undersøgelse har vist, at der forskes i brintteknologien i 39 lande, og der er udgivet papers på 21 sprog (ref. 2). 90% af informationerne kommer fra USA, USSR, Japan, Tyskland, Frankrig, England, Canada, Schweiz, Holland og Israel. Antallet af publikationer er faldet siden 1982. Langt de fleste lande arbejder med metoder for produktion af brint og for lagring i hydrider.

En stor fordel ved brintteknologien er, at alle de i brintsystemet indeholdte komponenter er kendt teknologi på et højt udviklingsniveau. Nogle af teknologierne, som f.eks. transport og lagring af brint, har været anvendt i industrien i flere årtier. Alligevel er intensiv forskning og udvikling nødvendig på flere betydningsfulde områder som eksempelvis anvendelsesmetoder, og der foregår derfor meget forskning og udvikling i udlandet vedrørende brintteknologien.

Følgende er en listning af brintrelevante teknologier, der allerede fungerer i dag (ref. 11):

- a) Solbaserede kraftværker med en kapacitet op til 30 MW eksisterer allerede.
100 MW-anlæg er i planlægningsfasen.
- b) Elektrolysører er kendt teknik. Det samme gælder for kondensatorer.
- c) LNG/LPG-kryotanke og kryobeholdere findes i dag. Ligeledes eksisterer rørsystemer for naturgas selv ned til havdybder på 600 m.
- d) Der findes ligeledes forskellige rørledningssystemer for gasformig brint på nogle hundrede km (f.eks. i Ruhr-distriktet), samt et vakuumkappe-system for flydende brint på nogle hundrede meter (Kennedy Space Centre i USA).
- e) Forskellige typer brændselsceller er under udvikling.
- f) Et pilotprojekt med H_2/O_2 -spinning reserve er i drift. Et pilotanlæg på 35 MW er i planlægningsfasen. Et højt inter-

ressant punkt er den realistiske forventning til, at de forbundne investeringer allerede er tilbagebetalt på mindre end et år ved at undgå den 1-3% op- og nedkørsel af dampkraftanlægget, hvor spinning reserveenheden indsættes.

- g) Biler med metalhydridlagre eller brintdrevne biler med flydende brint er i drift.
- h) H_2/O_2 -raketter fungerer. Dette er et punkt, hvor brint faktisk er uerstattelig i energimæssig henseende.

Nedenstående liste viser eksempler på forskningen i forskellige lande på brintområdet indtil i dag (ref. 7).

ARGENTINA	: Brintenergisystemer.
ØSTRIG	: Specielt udnyttelse af brint til flytransport.
AUSTRALIEN	: Følgende er testet: Ford-biler, GM-køretøjer, hydrider til biler og industri.
CANADA	: Forskellige tests af brint i transportmidler som biler, traktorer, jernbane, busser. Derudover brintproduktion og lagring.
KINA	: Brintbaserede maskiner.
TYSKLAND	: Biler med tanklagre, hydridlagre, flydende brintlagre og brændselsceller.
INDIEN	: Udnyttelse af brint som brændsel.
ITALIEN	: Brintbaseret motorcykel.
IRAK	: Brintproduktion.
ISRAEL	: Lagre og transportsystemer.
JAPAN	: Brint til transportmidler og lagre hertil.
POLEN	: Brintsystemer til fly.
SYDAFRIKA	: Generel brintforskning.
SVERIGE	: Studier om udnyttelsen af brint år 1985 til 2025.
SCHWEIZ	: Metalhydrider til transport.
USA	: Der er foregået forskning siden 1975 vedrørende brint som brændstof for diverse transportmidler.
USSR	: Brintbaseret transport, herunder specielt fly.
JUGOSLAVIEN	: Brintproduktion.

Indenfor International Energy Agency (IEA) blev IEA Hydrogen Agreement etableret i 1977, og siden da er der startet 9 for-

skellige annexer vedrørende brint, hvoraf de 6 er afsluttet. Annexerne omhandler følgende (ref. 15):

Annex 1	Thermochemical Production	år 1977-1988
Annex 2	High Temperature Reactors	år 1977-1979
Annex 3	Assessment of Potential Future Markets	år 1977-1980
Annex 4	Electrolytic Production	år 1979-1988
Annex 5	Solid Oxide Water Electrolysis	år 1979-1983
Annex 6	Photocatalytic Water Electrolysis	år 1979-1988
Annex 7	Storage Conversion and Safety	år 1983-
Annex 8	Hydrogen: Technical and Economic Assessment	år 1986-
Annex 9	Hydrogen Production	år 1989-

De i IEA-samarbejdet deltagende lande er følgende: Belgien, Canada, EF, Tyskland, Italien, Japan, Holland, Sverige, Schweiz, England og USA.

Af eksempler på forskning i de forskellige lande indenfor IEA-samarbejdet kan nævnes følgende:

Canada

Canada planlægger at producere brint på basis af vandkraft og vil derfor afprøve forskellige anvendelsesmetoder for brint i pilotprojekter. Der er også foretaget systemanalysestudier.

Tyskland

I 1990 blev arbejdet indenfor området koncentreret om følgende områder:

- 1) Energigenerering (solceller eller termiske teknikker i forbindelse med lande med stort solpotentialer).
- 2) Brintproduktion (elektrolyse, avanceret alkalisk elektrolyse, højtemperatur-elektrolyse, forskning indenfor biologisk brintproduktion).
- 3) Anvendelsesmetoder (brændselsceller, spidslast, kraftvarme).

4) Materialer og sikkerhed.

Tyskland anses af ref. 17 som den ledende nation med hensyn til international finansiering af brintteknologien. Statsstøtten til vedvarende energi beløber sig til $200 \cdot 10^6$ DM pr. år, hvoraf halvdelen i 1990 gik til udvikling af brintteknologien.

Japan

I Japan foregår forskning indenfor følgende områder:

- 1) Brintproduktion ved fastpolymer-elektrolyse (SPE).
- 2) Lagring og transport af brint ved brug af metalhydrid.
- 3) Anvendelsesområder (forbrænding, frem- og tilbagegående maskiner, biler etc.).
- 4) Sikkerhed (eksplosionsforebyggelse).
- 5) Fotokemiske processer, termokemiske cykler, højtemperatur- og højtrykselektrolyse, brint ud fra biomasse).

USA

I USA er forskningen rettet mod energigenerering ud fra solstråling. Produktion af brint på basis af sol er et biprodukt heraf.

5.1. Udenlandske forskningsprojekter

Forskellige planlagte og igangsatte projekter vil blive nævnt i det følgende. Projekterne er finansieret af industri, forskningsinstitutioner og ministerier.

De projekter, der er i gang i forbindelse med brintforskningen, har følgende formål:

- 1) Demonstration af muligheden for at benytte brint som energibærer.
- 2) Analyse af de tekniske problemer, der kan opstå ved drift under realistiske forhold.

- 3) Optimering og koordinering af de forskellige involverede systemer.
- 4) Udvikling af teknologier til prototypeniveau.
- 5) Demonstration af selvforsyning i tilfælde, hvor der ikke er energiforsyning baseret på fossile brændsler.

EURO-QUEBEC HYDRO-HYDROGEN PILOTPROJEKT (ref. 16)

I 1987 blev der foretaget et studium vedrørende udvikling, interkontinental transport og anvendelsen af brint som en ren energikilde på basis af billig vandkraft i stor skala. Efter dette studium er der nu iværksat et feasibilitystudium vedrørende transport af brint fra Quebec til Europa. Projektet udføres i år 1989 til 1991.

Følgende muligheder til transport undersøges:

- a) flydende brint i specielle tankskibe (evt. ved fly)
- b) flydende ammoniak i specielle tankskibe
- c) methylcyclohexan i olietankskibe.

Brinten skal benyttes i Europa til elektricitet, opvarmning, drivkraft i transportmidler, eller sammen med naturgas til privat og industriel forbrug.

Følgende anvendelsesaspekter undersøges også i feasibilitystudiet:

- Fjernvarme/kraftværksblokke på 6/2 MW (termisk/elektrisk).
- Brintbusnetværk i Hamburg.
- Kraftværks/drikkevandsblokke (14 MW; 18 m³/h drikkevand).
- Flybrændstof.
- Transport af flydende brint til individuelle forbrugere.

Feasibilitystudiet vil resultere i et detailprojekt vedrørende et integreret system for interkontinental transport af energi baseret på vedvarende energikilder.

BMW-BRINTBIL (ref. 16)

BMW i München og Messer-Griesheim udfører i samarbejde et demonstrationsprojekt om brugen af brint i personbiler. BMW har bygget en ny testfacilitet for brintdrevne forbrændingsmotorer. Brint lagres i flydende form. BMW samarbejder også med DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt) Stuttgart.

DLR-RAKETFORSØGSCENTER (ref. 16)

På DLR-raketforsøgscenter i Lampoldshausen i nærheden af Stuttgart er der blevet installeret den største infrastruktur med flydende brint i (Vest)Tyskland. Strukturen omhandler en lagertank på 270 m^3 og en lagertank på forsøgsraketfaciliteten på 600 m^3 . Indenfor testperioden vil der blive transporteret 10 lastbiler om ugen hvert indeholdende 40 m^3 brint.

HYDROGEN/OXYGEN-DAMPGENERATOR (HOS) (ref. 16, 17, 28)

Som et alternativ til op- og nedkørsel af effekten på et kraftværk har DLR foreslået en spontan generering af damp, der kan tilføres på basis af brint og ilt.

DLR afprøver derfor i samarbejde med flere forskellige virksomheder i Tyskland en brint/ilt-dampgenerator (HOS) som spinning reserve på to kraftværker.

I HOS-enheden bliver de to gasser brint og ilt i en støkiometrisk blanding omdannet til damp. Dampens temperatur nedsættes ved injektion af forvarmet fødevand til nøjagtigt det temperaturniveau, ved hvilket dampen skal injiceres i kraftværksprocessen.

Ved brug af et HOS-anlæg kan effekten på et kraftværk hurtigt forøges ved at føde en dampturbine fra generatoren, hvor brinten brændes i iltgas. Brint og ilt tilføres forbrændingskammeret inden forbrænding. Forbrændingsproduktet, der har en temperatur på 3000°C , afkøles til den ønskede damptemperatur

ved vandkøling og føres derefter ind i turbinen. Specielt er det vigtigt at bibeholde det støkiometriske forhold i fuelblanding for at undgå gaskomponenter, der ikke kan kondenseres (overskudsilt eller -brint). Startende ved en effekt på 0 kan fuld last (her 40 MW) opnås indenfor 1 sek. Der kan derved produceres damp med et tryk på 40-90 bar og en temperatur på 560-950°C.

Den økonomiske fordel ved processen er, at kapitalomkostningerne ved et sådant anlæg er meget lavere end anden spinning reserve. Dette er inklusive omkostninger til lagringsfaciliteter af gasserne, forsyningssystemet for brint, ilt og fødevand, samt omkostningerne ved selve HOS-enheden.

Derudover kan den del af kraftværkskapaciteten, der tidligere blev brugt som reservekapacitet, nu frigøres til elproduktion.

Der er udvalgt to værker til afprøvning af HOS-enheden. Det ene værk er det industrielle lavtryks-dampværk eget af Hüls i Marl i Tyskland, det andet værk er et kulfyret dampturbine-kraftværk i England, drevet af RWE.

Designdata for HOS-enheden:

<u>Termisk output (MW)</u>	<u>25 - 70</u>
Damptemperatur (°C)	515
Damptryk (bar)	20-40
Flowforhold (kg/s)	
Damp	9 - 24
Fødevand	7 - 20
Brint	0.18 - 0.49
Ilt	1.43 - 3.39

HOS-enheden kan benyttes overalt, hvor der er behov for større mængder af damp indenfor nogle få sekunder med kort varsel og på uforudsigelige tidspunkter. Sådanne anvendelsessituationer ses løbende ved regulering på kraftværker og i industrien, hvor det af sikkerhedsmæssige eller miljømæssige årsager ikke

er tilladt at afbryde dampforsyningen. På grund af de relativt høje omkostninger ved udvindelsen og lagring af brændslerne brint og ilt er HOS-systemet kun egnet til dækning af effektbehov i kortere perioder, f.eks. den tid der er nødvendig til at rejse trykket i konventionelle dampkedler eller til opstart af gasturbinekraftværker.

I nedenstående tabel fra ref. 28 er der foretaget en sammenligning af økonomien ved en traditionel reservekapacitet og ved HOS-enheden.

	Fossilt fyret basislast (mellemlast) kraftstation	H ₂ /O ₂ -spinning reserve (HOS)
Brændselspris	Importeret kul: 20 DM/MWh	Brint: 1.30 DM/Nm ³ (308DM/MWh) Ilt : 1.60 DM/Nm ³
Spec. kapitalomk.	2200 DM/kW el (basislast)	HOS-enhed: 326 DM/kW el 5.0 mio. DM alt inkl.
Benyttelsestid	7000 h/år (basislast) 4000 h/år (mellemlast)	18.3 h/år (fuldlast)
Levetid	20 år	20 år

Ved benyttelsen af HOS-enheden som spinning-reserve kan der således opnås besparelser i brændselsomkostninger i hovedanlægget, samt en øget udnyttelse af basislastværker og en reduktion af mellemlast og spidslast.

HYSOLAR-PROJEKTET

Projektet er et samarbejde mellem Tyskland og Saudiarabien omhandlende solbaseret brintproduktion og anvendelse.

HYSOLAR-projektet er opdelt i 6 programpunkter (ref. 11):

1. Opbygning af et 100 kW-elektrolyse demonstrationsanlæg baseret på solceller. Dette er verdens første større fuldskala-forsøg for produktion af solbaseret brint (Riyadh).

2. Elproduktion med 10 kW-forsøgs- og forskningsfacilitet (Stuttgart).
3. Drift af 2 kW-forsøgs- og forskningsfacilitet (Jeddah).
4. Generel forskning vedrørende fotoelektrokemi, avanceret alkalisk elektrolyse og brændselsceller.
5. Systemstudier og demonstration af anvendelsesmuligheder.
6. Oplagring og udveksling af erfaringer.

Derudover vil følgende brintteknikker blive afprøvet i laboratoriet i "Solar Village" beliggende 50 km NV for Riyadh, hovedstaden i Saudiarabien:

- brintmotor til stationære anvendelsesformål
- katalytisk ovn til brintforbrænding
- modificerede brintgaslamper (belysning)
- brint/iltdampgenerator (HOS).

6. PRODUKTION AF BRINT

Brint kan fremstilles på basis af mange forskellige energikilder, men ikke alle produktionskilder og metoder er lige attraktive set ud fra et økonomisk synspunkt. Størstedelen af den brint, der produceres til industrielle formål, fremstilles ud fra naturgas eller olie, enten som hovedprodukt eller som biprodukt ved en kemisk proces.

Kun en mindre procentdel af brinten fremstilles i dag elektrolytisk. Ved fremstilling ved elektrolyse skal der tilføres energi i form af elektricitet. Elektrolyseprocessen giver mulighed for at udnytte brint som lagringsmedie for el.

En årsag til, at det almindeligvis foretrækkes at fremstille brint ud fra kulbrinter, er, at der benyttes en mindre mængde energi til dette end til elproduktion og efterfølgende elektrolyse af vand (ref. 17).

Da der er stærk sammenhæng mellem energipriserne og priserne på kulbrinter, er der ingen grund til at tro, at metoderne for fremstilling af brint til industrielle formål vil ændre sig i den forestående fremtid. Dette er under forudsætning af, at der ikke iværksættes afgifter eller andre tiltag for at styre den miljømæssige forurening ved emissioner af kuldioxid, svovlkomponenter, NO_x og varme.

Termiske, termokemiske, biokemiske og fotokemiske processer anvendes endnu ikke til industrielle formål.

Produktion af brint har altid været en proces, der har været udsat for intensiv forskning og udvikling. Der er således indtil nu blevet opbygget en stor viden omkring fremstilling af brint, specielt på basis af dekomponering af vand, elektrolyse. Som det fremgår af det følgende, er processen stadigvæk under udvikling.

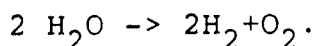
I det følgende vil der blive foretaget en kort gennemgang af de forskellige metoder til fremstilling af brint, mens elektrolyseprocessen vil blive gennemgået mere detaljeret.

6.1. Oversigt over produktionsformer

Brint er ikke en energikilde men en energibærer, der kan udledes af vand eller fossile brændsler.

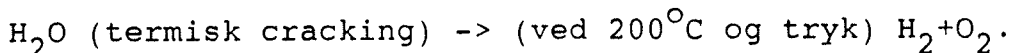
Følgende produktionsprocesser kan anvendes (ref. 7):

- a) Brint kan produceres fra vand ved elektrolyse:

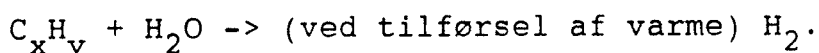


Den nødvendige el for at udføre processen kan produceres ud fra fossile brændsler, vandkraft, nuklear energi, geotermisk energi, tidevand, vindenergi, fusion eller solenergi.

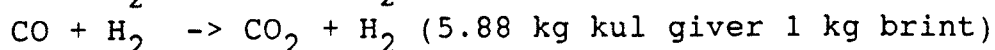
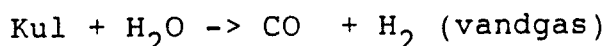
- b) En anden udvinding af brint kan være ved termisk cracking af vand:



- c) Reforming eller steamreforming, hvilket er en reaktion af naturgas eller olie med damp ved høje temperaturer:



- d) Kulgasificering er en proces, der har været under hurtig udvikling og er i kommerciel brug. Gasificeringsprocessen er miljømæssig attraktiv, da emission som svovl lettere kan fjernes. Ved processen dannes syntetisk gas, der herefter kan reformeres til brint:

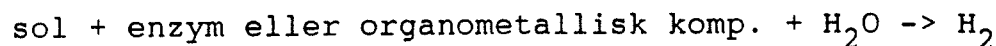


- e) Fast affald + luft $\rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$

- f) Cellulose + H_2O + luft $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$

- g) Biomasse + H_2O + luft $\rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$

- h) Fotokemisk brintproduktion:



- i) Direkte termisk dekomponering af vand (høje temperaturer).

- j) Biologisk eller biokemisk brintproduktion.

- k) Fotoelektrokemisk brintproduktion.

- 1) Brintproduktion ved direkte omdannelse af solenergi på havet.

Den termiske effektivitet ved produktion af brint ud fra sol er højest ved direkte termisk dekomponering af vand efterfulgt af termokemisk, elektrolytisk, magnetohydrolytisk og fotolytisk produktion (ref. 10).

6.2. Elektrolyse

Elektrolyse er blevet benyttet til fremstilling af brint i omkring 100 år. Det første større anlæg blev opført af Norsk Hydro i 1927 i Norge (ref. 17). I dag findes der adskillige store elektrolyseanlæg, der producerer brint og ilt. Eksempelvis kan nævnes Trail-anlægget i Canada, som producerer 140 mio. m³ brint om året. Brinten benyttes til produktion af kunstgødning, og ilten benyttes til metallurgiske formål.

I Indien findes Nangal-elektrolyseanlægget, opført i 1959, der producerer 220 mio. m³ brint om året. Brinten benyttes også her til kunstgødning. Anlægget producerer ydermere 15 tons tungt vand om året. Aswan-anlægget i Egypten producerer 170 mio. m³ brint om året. Norsk Hydro-anlægget i Norge (kendt tysk tungt vands-anlæg, der blev ødelagt under Anden Verdenskrig men genopbygget i 1965) producerer i dag 790 mio. m³ brint om året. Derudover findes der adskillige store elektrolyseanlæg i Tyskland, Italien, Canada og USA, og mange anlæg i mindre skala i forskellige andre lande (ref. 27).

Større elektrolyseanlæg bliver som regel kun opført, hvis der er billig elektricitet til rådighed som f.eks. vandkraft. Mindre elektrolyseanlæg med kapaciteter på 50-500 m³ brint/h benyttes oftest i industrien, da disse anlæg er simple og lette at operere. Derudover er omkostningerne til sådanne anlæg meget moderate. På verdensbasis fremstilles omkring 5% af al brint ved elektrolyse.

Typiske driftskonditioner er elektrolyttemperaturer på 70-90°C, en celledspænding på 1.85-2.05 V og en strømtæthed på 2-3 kA/m². Energiforbruget er mellem 4 og 5 kWh/m³.

Konventionelle elektrolyseapparater har i dag en el-effektivitet på 80-88%. El-effektiviteten forventes at kunne forøges op til 88-94% (ref. 17). Derudover kan den næppe forbedres yderligere. Dette gælder for elektrolysører baseret på elektricitet som den eneste energitilførsel. Nye højtemperaturolektrolysører er under udvikling, hvor energitilførslen er baseret på el såvel som spildvarme. Der kan herved opnås en noget højere el-effektivitet ved produktion af brint.

Der findes 3 forskellige former for vandelektrolyse:

- alkalisk vandelektrolyse
- fastpolymer elektrolyse (SPE)
- højtemperatur elektrolyse (700-1000 °C)

Derudover foregår der forskning vedrørende fotokatalytisk elektrolyse, der virker ved, at al energien eller størstedelen af den kommer i form af lys. I princippet kan denne form for elektrolyse betragtes som en brintproducerende solcelle (ref. 16).

I det følgende beskrives de 3 elektrolyseformer nøjere.

ALKALISK ELEKTROLYSE

Indenfor IEA anses den mest favorable metode til fremstilling af brint at være avanceret alkalisk vandelektrolyse (ref. 15). Udover det monopolære system, der videreudvikles i Canada, opskaleres to bipolar systemer nu i Tyskland. Et af disse systemer testes i forbindelse med solbaseret drift.

Alkalisk elektrolyse foregår som regel på små eller middelstore anlæg (0.5-5 MW, 100-1000 Nm³/h), medmindre strømmen er meget billig. Den mængde energi, der skal tilføres ved elektrolysen i form af strøm, er ca. 4 kWh/Nm³, inkl. energitab og

energi til pumper etc. Elektrolysen foregår ved en temperatur på 70-100°C.

Eksempler på kommercielle elektrolysører (ref. 16):

Tabel 6.1. Driftsforhold for forskellige elektrolysører

	Electrolyzer Corp. Ltd.	Lurgi	Norsk Hydro	Hydrogen Systems NV
Tryk	normal	30 bar	normal	10 bar
Temperatur	70°C	90°C	80°C	100°C
Strømtæthed (kW/m ²)	2.50	2.1	2-3	7.5
Cellespænding (V)	1.85	1.9	1.71	1.65
Energibehov (kWh/Nm ³)	4.4	4.5	4.1	3.9
Effektivitet (%)	80	79	87	91

Effektiviteten er defineret som forholdet mellem den producerede energi og den indkomne energi: E_{ud}/E_{ind} .

Som det fremgår af ovenstående tabel findes der i dag elektrolysører med en effektivitet på 91%.

Lurgi-elektrolysøren er en højtrykselektrolysør. Den har den umiddelbare fordel, hvis brinten videre i forløbet skal komprimeres, at brinten bliver produceret ved højt tryk, og der kan således undgås en videre kompression. Der kan derved springes et procesled over.

Den videre udvikling vedrørende alkalisk elektrolyse retter sig mod:

- en forhøjelse af arbejdstemperaturen
- nye membraner
- nye elektrokatalyser, specielt hvad angår iltelektroden.

Udviklingsarbejdet er ikke kun rettet mod en forbedring af effektiviteten men også mod en lavere investering, således at

den endelige pris for den producerede brint kan reduceres.

FASTPOLYMER ELEKTROLYSE (SPE)

Størstedelen af den forskning, der er foregået indenfor området fastpolymer elektrolyse, er foregået i industrien, og der findes derfor ikke meget tilgængeligt litteratur på området. De to største firmaer på området er ABB og General Electric. General Electric har anlæg i størrelsesordenen nogle få kW til 100 kW. I 1984 solgte General Electric deres SPE-elektrolysører til Hamilton Standards. ABB opgav i 1989 videreudvikling af SPE-elektrolysører uden nærmere angivet grund i referencen (ref. 16).

ABB har rapporteret om effektiviteter på ca. 85% på deres SPE-elektrolysører.

Indenfor IEA Hydrogen-programmet præsenterede nogle japanere for nogle år siden en celle, der ved 100-130°C og 5 bar kunne operere ved en celledspænding på 1.7 V og en strømtæthed på 10 kA/m². Cellen var på 0.32 m² og kunne producere 1.3 Nm³ brint pr. time svarende til en effektivitet på 88%.

HØJTEMPERATURELEKTROLYSE

Højtemperaturelektrolyse er elektrolyse af vanddamp ved ca. 1000°C. Elektrolytten er af et fast keramisk materiale, der leder iltioner, modsat konventionel elektrolyse, hvor ladningerne ledes af ioner i en vandig opløsning.

Årsagen til, at interessen er vakt for denne teknologi, er at spændingen falder med stigende temperatur, d.v.s. en del af energien kan komme i form af spildvarme. En del af den varme, der tilføres processen, kan genanvendes ved varmeveksling med de varme producerede gasser, ilt og brint. Ud af 1.72 V, der er nødvendige til processen, kan 0.25 genanvendes (normaltryk). Set ud fra et elmæssigt synspunkt er det således ved højtemperaturelektrolyse muligt at få en elvirkningsgrad på 1.37. D.v.s. for 1 kWh el tilført (samt noget spildvarme ved

1000°C) kan der produceres 1.37 kWh brint.

6.3. Økonomiske forhold

Nedenstående tabel viser i skemaform effektivitet og omkostninger ved produktion af brint ud fra et bredt udvalg af fremstillingsprocesser ved en kapacitet på 120.000 Nm³/h og 20-40 bar (ref. 16). Fremstillingsprocesserne er ikke nærmere omtalt i rapporten.

Tabel 6.2. Omkostninger ved forskellige fremstillingsmetoder for brint

Proces	Råmateriale	-- Effektivitet --		-- Biprodukt --		Prod.omk. US\$/Nm ³
		Brint	Biprod.	Art	Mængde	
Steam reforming	naturgas	78.5	<0.1	damp	70 kg/h	0.067
Partiel oxidation	olie	76.8	-	svovl	1300 kg/h	0.11
Gasifikation, Texaco	kul	63.2	-	svovl	3000 kg/h	0.16
Gasifikation, Koppers, Totzek	kul	57.7	-	svovl	400 kg/h	0.18
CIG	kul	45.7	5.4	elkraft	14.5 MW	0.13
Elektrolyse	el	27.2	-	ilt	29 t/h	0.2
Kulgasifikation med elektrokemisk skift	kul	34	38	damp	750 t/h	0.10
Kulgasifikation med højtemperaturelektrolyse	kul	57	-			0.16
Metan-cracking	naturgas	54	39	kulstof	33 t/h	0.06

Priserne er i 1987-niveau.

Det skal bemærkes, at tallene i tabellen er set ud fra et råmaterialesynspunkt, d.v.s der er indregnet en effektivitet på 40% ved omdannelsen af kul til el. Dette medfører den meget lave effektivitet angivet for elektrolyse. Denne omdannelse bør der ses bort fra, når interessen for brint drejer sig om et muligt ellager, d.v.s et system hvor elektriciteten allerede findes.

Metoder til brintproduktion på basis af vand (ref. 22) var genstand for 44% af de artikler, der blev præsenteret ved 5th

World Hydrogen Energy Conference (juli 1984). De artikler, der omhandlede vandelegkrolyse, pegede hen mod et mål på et energiforbrug til processen på under 4.5 kWh pr. Nm³ brint produceret ved konventionel vandelegkrolyse og meget mindre ved højtemperaturrelegkrolyse, da der her er termodynamiske og kinetiske fordele forbundet med højtemperaturdriften.

Der var på konferencen præsenteret studier vedrørende højtemperaturrelegkrolyse ved 1000°C, der involverede elektrisk og termisk energi udvundet fra kul med forventede produktionsomkostninger på 17-22 cent pr. Nm³ brint. Dette er mere end det dobbelte af omkostningerne ved steam-reforming, men sammenlignelig med omkostningerne ved kulgasifikation og ved konventionel elektrolyse.

Med udgangspunkt i ref. 53 fra 1989 fås en investeringsomkostning på 2020 kr./kW for et konventionelt elektrolyseanlæg med en produktion på ca. $934 \cdot 10^6$ Nm³ om året. De tilsvarende drifts- og vedligeholdelsesomkostninger udgør 10,3% af investeringen årligt.

6.4. Sammenfatning i forhold til produktion af brint i Danmark

Hvis formålet med en brintproduktion i Danmark er at omdanne elektricitet til brint, for dermed at opnå en lagringsmulighed, er elektrolyse den relevante produktionsmetode. Dette vil være i tilfælde, hvor der er tale om overskudsel som f.eks. el produceret i lavlastperioder eller billig importeret el. Under andre omstændigheder kan det overvejes at gå direkte fra kulgasifikationen til produktion af brint for således at springe et procesled over.

Valg af elektrolysemetode kan diskuteres, idet de forskellige elektrolysører har hver deres fordel. Trykelektrolysøren har således hævet den producerede brints tryk til 30 bar, hvorved en del efterfølgende kompressionsarbejde inden transport og lagringsprocessen kan spares. Højtemperaturrelektrolysøren har den umiddelbare fordel, at der kan opnås en meget høj eleffek-

tivitet. Dette kræver imidlertid, at der er en højtemperatur-varmekilde til rådighed.

Til scenarieudregning er blevet benyttet den konventionelle alkaliske elektrolysemetode med høj virkningsgrad.

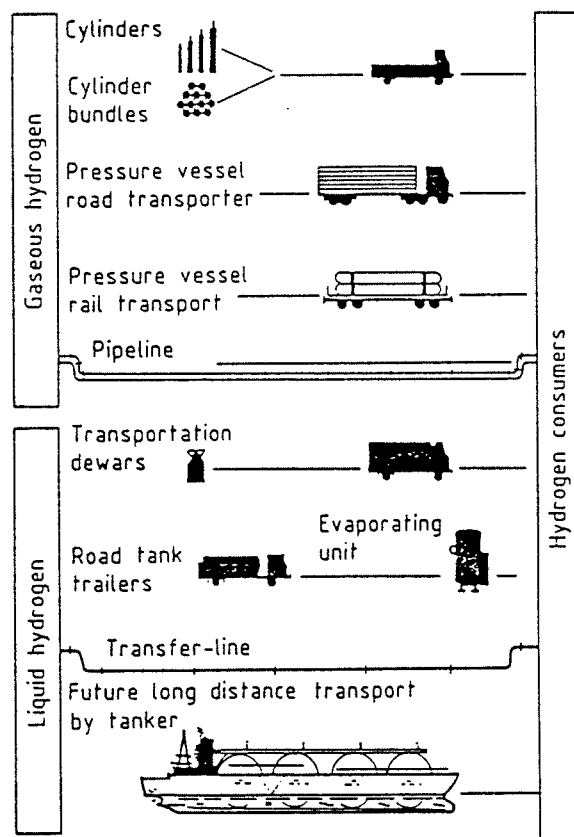
Nøgletal:

Produktionsform	: Alkalisk elektrolyse
Arbejdstryk	: 10 bar
Temperatur	: 100°C
Elvirkningsgrad	: 91% nutid, 94% fremtid
Investeringsomkostninger	: 2020 kr./kW
Drifts- og vedligeholdelsesomkostninger	: 207 kr./kW

7. TRANSPORT AF BRINT

Brint er en gas, der benyttes meget i den kemiske industri i dag. Der findes nogle store leverandører på området, der er verdensomspændende, heriblandt L'Air Liquide. L'Air Liquide leverer i dag brint til størstedelen af Europa, og transport af brinten foregår i gasform på flasker leveret via jernbane eller transporteret på lastbiler.

Forbrugerne af brint i den kemiske industri (ammoniak-, syntetisk gas og petrokemiske anlæg) producerer som regel selv deres brint på anlægget. Små- eller mellemstørrelsesforbrugere derimod får deres brint leveret i gasformig eller flydende form transporteret på forskellige måder. Mulighederne for transport af brint er vist i nedenstående figur 7.1 (ref. 17).



Figur 7.1. Transportmuligheder

Ved en fremtidig anvendelse af brint som energibærer vil det være nødvendigt at kunne transportere store mængder af brint mellem forskellige regioner og evt. landene imellem. I den forbindelse overvejes derfor transport af gasformig brint i rørledninger eller transport af flydende brint i tankskibe (ref. 17).

I to projekter, der er under udvikling, er det tanken at transportere brint i stor skala i tankskibe (ref. 16).

Det ene projekt er et samarbejde mellem EF og Hydro-Quebec, og ideen med projektet er at producere brint ved elektrolyse i Canada, transportere brinten i tankskibe eller specielt udstyrede fly til Europa og anvende brinten her. Der er overvejet flere metoder at anvende brinten på, eksempelvis offentlig bustransport, fly og kraftvarmeværker.

I projektet er der undersøgt 3 forskellige metoder at transportere brint på: flydende brint, ammoniak og methyl-cyclohexan. Ammoniak er blevet opgivet, sandsynligvis på grund af dets sundhedsfare. Undersøgelsen beskriver transport af flydende brint i såvel tankskibe som fly, og transport af methyl-cyclohexan i tankskibe.

I dette projekt er transmissionskoefficienten for brint defineret som følgende:

$$E_t = E_{ud}/E_{ind}$$

E_{ud} er energiindholdet af brint leveret pr. tidsenhed, og E_{ind} er den totale energi leveret til systemet, d.v.s. energien til elektrolyse, til fortætning, til transport etc. pr. tidsenhed.

For methyl-cyclohexan findes en transmissionskoefficient på 0.5, mens transmissionskoefficienten for flydende brint er lidt mindre (0.45).

Det ses således, at energiindholdet i brinten bliver brugt til produktion og transport. Effektiviteten kan imidlertid forøges noget, hvis spildvarmen fra de forskellige processer kan ud-

nyttes.

Det andet projekt er et tysk studieprojekt, der omhandler produktion af brint i stor skala ved elektricitet produceret på solceller i Sahara. Der er flere forslag til, hvordan brinten kan transporteres til Tyskland, i rør, i tankskibe, eller via eltransmission.

Brint er imidlertid en meget effektiv energibærer. For større afstande er det således billigere at transportere energi i rørledninger i form af brint end som elektricitet (ref. 20).

7.1. Transport i rørledninger

Naturgas transporteres verden over i rørledninger. Der findes imidlertid kun ganske få rørsystemer, der kun transporterer brint, selvom en sådan transport kan foregå relativt problemfrit.

I nedenstående tabel er nævnt allerede eksisterende rørledningssystemer til transport af brint (ref. 17). Alle systemerne transporterer gasformig brint, med undtagelse af NASA, der transporterer brint i flydende form.

Tabel 7.1. Eksisterende røret til brint

	Længde km	Diameter mm	Driftstryk MPa	Flow- kapacitet
L'Air Liquide, Frankrig				
Belgien, Holland	total 300	100	<10	
Sverige	6 transfer liner, 6 km	50-250	0.01-2.8	10.000 m ³ /h
Air Products	62	80-30	3.5-4.0	270*10 ⁶ m ³ /år
Houston, USA				
Chemische Werke, Hüls	208	100-300	2.2	250*10 ⁶ m ³ /år
Rhein-Ruhr-Gebiet, Tyskland				
NASA, Florida, USA	0.4	150	0.15	

Rørledningssystemet i Rhein-Ruhr-distriktet blev etableret i 1939, idet Chemische Werk Hüls siden dengang har stået for driften af et procesanlæg, der fremstiller acetylen, ethylen, brint og andre kemiske produkter. Brint renses i et kryogenisk system ned til et niveau på under 10 ppm urenheder, ekskl. nitrogen. Procesanlægget har en kapacitet på 350 mio. Nm³ brint/år og er i drift mere end 8730 timer om året. Derudover producerer 2 kloranlæg 200 mio. Nm³ brint/år med meget høj renhedsgrad (ref. 21).

Hüls konstruerede derfor et rørledningsnet til distribuering af brint med høj renhed i Rhein-Ruhr-distriktet. Opbygningen af rørledningssystemet blev startet i 1939 og har i dag en længde på 220 km. Rørledningen er 100-300 mm i diameter og normaltrykket er på 25 bar.

Ledningsnettet er tilknyttet 12 forbrugere, 2 producenter og 2 firmaer, som alle er i stand til at trække på nettet eller levere til det, alt efter deres behov. Nettet bidrager således til en optimering af brintbalancen i Rhein-Ruhr-distriktet. Ved hvert indtagningssted er placeret et rensningsudstyr, således at brinten i hvert enkelt tilfælde får den ønskede kvalitet.

Al drift, check af systemet og vedligeholdelse foregår centralt fra et kontrolrum, således at masseflow, brintkvalitet, tryktab o.s.v. hele tiden kontrolleres af driftspersonalet, og sikkerhedsforanstaltninger kan iværksættes automatisk eller manuelt om nødvendigt.

De erfaringer, der er indhentet med Hüls' rørledningssystem, er blevet benyttet i forbindelse med planlægning, konstruktion, drift og vedligeholdelse af andre rørledningssystemer til transport af brint.

Et andet eksempel på brinttransport i rørledningsnet er L'Air Liquides brintledningsnet, der består af flere individuelle rørledningssystemer med en diameter på omkring 100 mm og et tryk på 100 bar. Brinten er garanteret en meget høj kvalitet

med en renhed på 99.995 volumen procent og med urenheder af O_2+H_2O på under 5 ppm og uden spor af kulbrinte. Brinten bliver leveret hos kunden ved et tryk mellem 5 og 50 bar alt efter kundens ønsker. L'Air Liquide er ansvarlig for hele systemet helt hen til kundens indgang (ref. 21).

Der findes således i dag fuldt tilstrækkelige erfaringer i transport af gasformig brint i rørledningsnet.

Hvis det er tanken, at naturgasledninger skal konverteres til transport af brint, er det dog nødvendigt at overveje stålmaterialets holdbarhed overfor brint ved de forventede driftsforhold, eksempelvis trykniveau på op til 100 bar.

7.2. Sikkerhed i forbindelse med transport af brint

Det er i dag velkendt, at stålbeholdere, der indeholder tryksat brint, under visse forhold får revnedannelser som følge af en reaktion mellem stål og brint. Metalskørhed på grund af brint har været kendt helt tilbage til det forrige århundrede, og der er foretaget adskillige studier i den forbindelse. Det var imidlertid først, da der opstod uheld i 60'erne, at man virkelig blev opmærksom på problemet under længere tids lagring af brint.

Der udføres nu et udredningsprojekt på L'Air Liquides Claude Delorme Research Center med det formål ikke blot at forbedre stålets modstandskraft overfor brint, men også at udvikle beskyttelsesteknikker for materialerne i forbindelse med tilstedeværelsen af tryksat brint (ref. 21).

I praksis har L'Air Liquide leveret tryksat brint i stål- og aluminiumsbeholdere i over 15 år over hele Europa, og der har her aldrig vist sig materialemæssige problemer forårsaget af brinten.

Der er blevet foretaget et udredningsarbejde, hvis hensigt var at bestemme materialerne og dimensioner for et distributions-

system for brint (ref. 20). Resultatet af projektet var, at såvel rør som komponenter, der benyttes i almindelige naturgasnet tilknyttet boliger, skulle være fuldt tilstrækkelige til levering af brint også. Det ville være nødvendigt med en noget større volumetrisk kapacitet på målerne samt nogle tilrettelser. Brint påvirkede ikke de mekanisk og fysiske egenskaber på de metalliske komponenter i systemet. Der var dog nogle indikationer på, at plastikprodukter, smøremidler og klæbestoffer blev påvirket af at blive udsat for brint. Selvom det volumetriske lækageforhold mellem brint og gas er på 2.9-3.5, vil energitabet på grund af lækage være det samme i de to situationer. Brintlækager vil ikke antænde spontant, hvis ikke der er nogen antændingskilde i nærheden.

U.S. National Bureau of Standards har foretaget adskillige udredninger vedrørende sikkerhedsforhold ved anvendelse af brint som almindelig brugt brændsel (ref. 29). Bureauet konkluderer, at benyttelsen af brint vil kræve oplæring i nye sikkerhedsforanstaltninger, men risikoen ved benyttelsen af brint som energibærer er ikke større end ved benyttelsen af ordinære brændsler.

7.3. Økonomi

7.3.1. Energibalance

I det følgende gives et eksempel på, hvorledes energien bruges til transport af brint i rør (ref. 16).

Brint ved et tryk på 100 bar skal transporteres 4000 km væk fra produktionsanlægget. Det er derfor nødvendigt med 9 kompressorstationer undervejs indtil endestationen. Ved en kompression ved hver station hæves trykket fra 83 til 100 bar. Den mængde energi, der benyttes til kompression, er teoretisk givet ved $W = 13.5 \cdot 10^{-3} \cdot \ln v$, hvor v er kompressionsforholdet. Dette giver for 9 kompressorer $W = 0.023$ kWh/kWh brint, d.v.s. omkring 2% af den transporterede mængde energi. Den elektricitet, der skal bruges til kompression, kan frem-

komme ved forbrænding af brint i turbiner, hvilket foregår ved en effektivitet på omkring 40%. Alt i alt betyder dette, at ca. 5% af energiindholdet i den transporterede brint går til transport i rør.

7.3.2. Økonomiske forhold

I forhold til naturgas kræver brint 3.5-4 gange mere kompressionsenergi for at transportere den samme mængde energi. Derved bliver totalomkostningerne ca. 1.3-1.6 gange højere. Derudover må der forventes et fordampningstab på 7-11% ved distributionen af brint. En undersøgelse har vist, at rørledninger er den absolut billigste metode til at transportere brint i gasformig form såvel over korte som lange afstande. Transport af flydende brint via jernbane eller vej er ca. 5 gange dyrere, mens benyttelse af trykgascylindre er den absolut mest kostbare transport (ca. 50 gange dyrere, når omkostninger til udstyr såsom gascylindre iberegnes) (ref. 17).

Tabel 7.2. viser en sammenligning af omkostningerne ved at transportere forskellige energibærere over en vis afstand.

Tabel 7.2. Omkostninger for transmission af forskellige energibærere som forholdstal

Energibærere	Transmissionsafstand, km		
	100	200	300
gasformig brint (rør)	6	10	24
flydende brint	41	80	180
naturgas (rør)	4	7	13
benzin	5	14	40
methanol	10	18	46
elektricitet	70	80	111

Omkostningstallene er forholdstal. Som det fremgår, er det langt billigere at transportere brint end elektricitet, selv over mindre afstande.

7.4. Sammenfatning i forhold til transport af brint i Danmark

I nærværende rapport er brint tænkt benyttet i forbindelse med lagring af store mængder overskudsel i Danmark. Det må tilsvarende forventes, at det er større mængder brint, der skal transporteres.

Brintsystemet skal indgå i energisystemet og således altid distribueres over de samme afstande til samme endepunkter (de brintforbrugende apparater).

Ud fra disse synspunkter anses rørtransport af brint at være den mest hensigtsmæssige transportform i Danmark, vel at mærke som et led i energisystemet. Transport af brint i rør er også langt den billigste transportform.

8. LAGRING AF BRINT

8.1. Lagringsformer

Lagring af brint kan principielt ske i de tre tilstandsformer: gasformig, fast eller og flydende. Den faste tilstandsform er dog ikke i form af ren brint, men som kemiske forbindelser. Metoderne er stærkt afhængige af den benyttede tilstandsform, og i det følgende vil der derfor ske en deling af afsnittet efter tilstandsform.

8.1.1. Lagring af gasformig brint

Denne form for lagring af brint er den, der har været benyttet længst, og som i dag er mest udbredt, idet brint distribueres af de kommercielle leverandører som tryksat gas på stålflasker. Der findes derfor en betydelig viden og know-how om denne lagringsmetode også i Danmark. Metoden benyttes til lagring af mindre brintmængder og er uegnet til lagring af så store mængder, som er nødvendige i forbindelse med døgnudjævning eller sæsonudjævning af lasten på et elproduktionsanlæg med en effekt på 100-300 MW. Tryksat brint ved tryk op til 200 bar kan dog have interesse til mindre mobile lagre til transportformål i f.eks. bytrafik, da brinten i sig selv har en meget forureningsfri forbrænding.

Brint kan lagres i de fleste stenstrukturer i underjordiske systemer på samme måde som naturgas. Den høje diffusivitet af brint har kun ringe effekt på lækageforhold.

Udnyttelse af kaverner til undergrundslagring af naturgas er en teknik, der benyttes i stor skala også i Danmark. Selv om de fysiske og kemiske forskelle mellem brint og methan betyder, at man ikke uden videre kan substituere methan med brint i en kaverne, så er teknikken principielt den samme. Der stilles blot andre krav til materialer og stabilitet af kavernen,

ligesom lagerets data vil være anderledes. Det faktum, at teknikken er benyttet i Danmark, betyder, at der findes et erfaringsgrundlag at bygge på, hvis man ønsker at foretage underjordisk brintlagring. Erfaringerne er i høj grad knyttet til DONG.

Kaverner benyttet til naturgas er oftest salthorste, der er udhulet ved spuling af horsten med vand og efterfølgende fjernelse af den saltholdige opløsning. De saltforekomster, der har interesse, findes i reglen i en dybde af adskillige hundrede meter under jordoverfladen og har karakter af lag med tykkelse mellem 50 og flere hundrede meter, eller de har form i retning af en halvkugle.

Saltforekomster er stort set uigennemtrængelige og er derfor egnede til at holde på brinten. Selve hulheden skabes ved kontrolleret spuling med ferskvand, og på denne måde kan der frembringes hulrum i saltet med regelmæssig, konisk form med henblik på mekanisk stabilitet af lageret. Når lageret fyldes, fortrænger brinten den sidste saltopløsning og kan tryk-sættes til den grænse, der er bestemt af lagerets mekaniske data.

Den øvre og nedre grænse for tilladeligt tryk i et saltlager er bestemt af det hydrostatiske tryk i kavernens top. Vejledende er grænserne mellem 2 og 0,5 gange det hydrostatiske tryk. For en kaverne beliggende i en dybde af 1000 m betyder det en trykvariation mellem 50 og 200 bar.

DONG's NATURGASLAGER I LILLE THORUP

DONG har herhjemme erfaring med lagring af naturgas i saltkaverner i forbindelse med etablering og drift af naturgaslageret i Lille Thorup. Lageret består af 6 kaverner (ref. 13).

Der er udskyllet 3 kaverner, der er taget i drift i 1986 og 2 i 1989. Den sjette kaverne er ved at blive gasfyldt.

Toppen af kaverne ligger i gennemsnit i 1500 m's dybde. Det geometriske volumen er gennemsnitligt 450.000 m^3 . Den største på 531.000 m^3 anses for verdens største gaskaverne. Der er i alt lagret 500 mio. Nm^3 gas i kaverne. Lageret er designet til at kunne trække $450.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ud af lageret, mens der kan injiceres $150.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ fordelt på 3 systemer.

Lagerets designtryk er 220 bar, men sikkerhedsventilerne letter ved 180 bar. Trykket er målt nede i kavernen. Arbejdstryk i naturgasnettet er 80 bar.

Der ligger en sump med vand i bunden af kaverne, da det er umuligt at få alt vandet fra udskylningen væk. Der er lagt 70 cm "tyggegummilag" over sumpen (tysk metode) for at reducere vandindholdet i kavernen. Der kan opstå problemer, hvis der er for meget vandindhold i kavernen, idet gassen kan reagere med vand. Dette vil imidlertid næppe skabe problemer i forbindelse med brint.

Temperaturen i kavernen er 20°C på grund af udskylningen, mens brints naturlige temperatur er 50°C . Der vil derfor ske en tilpasning mod de 50°C over en periode.

En stor fordel ved lagring i saltkaverne er, at saltet ved udskylning med vand bliver plastisk, således at der dannes en plastisk og tæt overflade. Omkring borerøret, der ellers er det kritiske punkt, dannes ligeledes en naturlig forsegling, og der har ikke været nogle lækageproblemer her.

Der har ikke været registreret noget tab fra lageret indenfor måleusikkerheden. Lageret har dog ikke været benyttet ret meget, mest til forsøgskørsel. Lageret skal levere supplerende gas i kolde vinterdøgn, men vintrene har været milde i den tid, lageret har eksisteret.

Utætheder i rørsystemet er imidlertid almindelige, og der kræves derfor brandgodkendelse. Brandtilsynet går udstyr igennem og kræver en vis sikkerhedsafstand.

BRINTLAGER I TEESIDE

I England nord for Middlesborough har ICI (Imperial Chemical Industries) et stort anlæg til lagring af brint i undergrunden. Tre store kaverner er udvasket i saltlag i 360 meters dybde, og her lagres 95% rent brint som tryksat gas ved 50 bar og omgivelsernes temperatur. Det geometriske rumfang for dette lageranlæg er 2 mio. m³ svarende til et energiindhold på ca. 1 PJ.

Lageret i Teeside blev taget i drift tidligt i 1970'erne, og ICI har således henvend 20 års erfaring med lagring af tryksat brint i saltkaverner.

Lageret er brinekompenseret og holdes på konstant tryk. Under opladning indpumpes brint ved 50 bar, og brine i form af mættet saltopløsning fortrænges fra lageret til damanlæg på jordoverfladen. Omvendt fyldes brine i lageret, når brint tappes fra lageret. Der er flere fordele ved denne driftsform. Der er dels tekniske fordele ved at kunne arbejde mellem konstante trykniveauer, og desuden kan denne type gaslager udnytte hele lagerets indhold af brint.

Kaverner med variabelt driftstryk må arbejde i et trykinterval af hensyn til lagerets stabilitet. Dette betyder, at disse lagre altid skal indeholde en gasmængde (basisgas) svarende til minimaltrykket. Initialinvesteringen i denne basisgas er ikke ubetydelig.

Teesidelageret indgår i et distributionssystem for brint, hvor et ca. 16 km langt distributionsnet med rør placeret over jorden forbinder en række virksomheder, der enten er storforbrugere af brint eller er producenter af brint bl.a. som biprodukt i produktionen.

Ifølge ref. 103 har erfaringen vist, at lagring af brint i kaverner udvasket i saltlag under jorden er en sikker, økonomisk attraktiv og miljømæssigt acceptabel teknik, især når store lagervolumener kræves. Kaverner i størrelsesordenen

10.000-120.000 m³ kan placeres i tynde saltlag 20-60 m dybe, og i de betydeligt større salthorstformationer er kavernestørrelser på omkring 200.000 m³ typiske. "Overburden pressure" i undergrunden angives i ref. 85 at stige med 0,226 bar/m i dybden, og lagertryk ligger på omkring 50-70% af dette. Temperaturniveauet bør holdes tæt på omgivelsernes temperatur (ca. +0.03°C/m) for at undgå termisk induceret "stress cracking" i den omgivende salt.

Tabene af brint fra sådanne lagre vurderes af ref. 103 at være meget små. I ICI's lange erfaringsperiode har der ikke været målt tab indenfor målingernes usikkerhedsinterval. Dette angår brinekompenserede lagre, hvor brintens opløselighed i vand via brinen i princippet udgør en mulig tabsvej, der ikke eksisterer i tørre kaverner. Forespurgt forventer K.P Martin (ICI) ingen H₂-tab fra kaverner i salthorste uden brinekompenseret drift.

KIEL

Flere steder i litteraturen omtales Stadtwerke Kiels saltkaverne som et lager for bygas med 60-65% brintindhold, der har fungeret som sådant siden 1971. Ved kontakt til Stadtwerke Kiel (ref. 104) er det oplyst, at dette er korrekt for perioden 1971-75. Siden 1975 har lageret imidlertid fungeret som lager for naturgas.

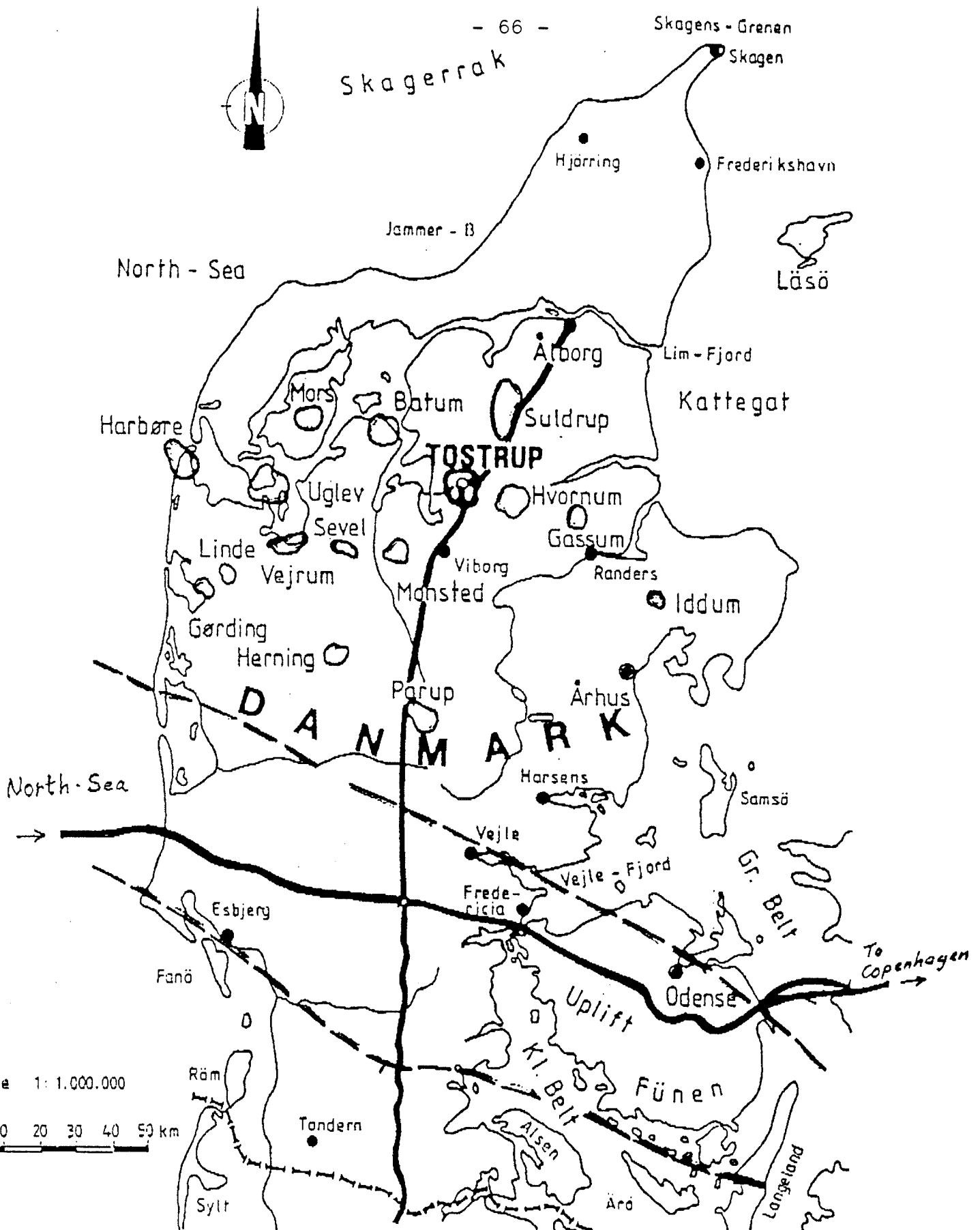
Lagring af brint i undergrunden kan også finde sted i dybtliggende vandførende jordlag, aquiferer. Sådanne lag består af porøse gennemtrængelige geologiske materialer, og princippet i brintlagring er, at brinten trykkes ned i laget og fortrænger vandet. På den måde kan der skabes større brintansamlinger i lighed med, hvad der kendes fra naturlige olie- og gasforekomster. De geologiske forudsætninger for denne type af lager er, at det porøse lag har form som en klokke eller lignende, og at det opadtil begrænses af et forseglende lag, der kan forhindre brinten i at diffundere mod jordoverfladen.

Det lagertryk, der kan benyttes i forbindelse med aquiferer, er afhængig af det hydrostatiske vandtryk i de pågældende lag, og dette tryk hænger sammen med dybden, laget findes i (1 bar pr. 10 m vandsøjle).

For begge de nævnte former for undergrundslagring gælder, at de geologiske krav, der stilles til beliggenheden, er relativt specielle og der kan således ikke påregnes etablering af lagre, hvor der umiddelbart er brug for det. Produktionsstederne må tilpasses lagringsmulighederne, eller transport af brint gennem rørledninger vil være nødvendig. En nærmere kortlægning af de geologiske muligheder i Danmark falder udenfor rammerne af denne rapport, men et væsentligt materiale vil være tilgængeligt gennem naturgasselskaberne. Eksempelvis er der foretaget en kortlægning af salthorstone beliggende i Nordjylland (figur 8.1). Der findes i alt 14 salthorste i dette område. Der findes også salthorste på Sjælland, de er imidlertid beliggende i større dybder.

Til lagring af meget store mængder er undergrundsteknikken den metode, der giver mulighed for størst kapacitet. Brintmængderne kan andrage adskillige millioner Nm^3 (normal- m^3 eller m^3 gas ved 1 atm. og 0°C). En million Nm^3 svarer til en energimængde på 10 TJ (baseret på den nedre brændværdi af brint), og størrelsesordenen er således mere end tilstrækkelig til at dække det lagringsbehov, der har været nævnt fra elværkerne under diskussionerne om nærværende projekt.

Undergrundslagring i udtømte olie- og gasfelter er en mulighed, som har en vis interesse, idet lagringslokaliteten så på forhånd er udpeget og beskrevet, og idet en væsentlig del af de nødvendige installationer ligeledes på forhånd er tilstede efter udnyttelsen af de fossile forekomster. Dette lager vil derfor være billigt at konstruere, men med udgangspunkt i danske forhold er muligheden ikke nærliggende, med mindre man tager transmission til Nordsøen med i betragtning. Denne form for lagring er derfor ikke nærmere omhandlet i denne rapport.



Legend

- City, Town
- Salt Dome
- Uplift — Pipeline

	GAS CAVERN PROJECT TORUP	Fig 4.1
KBB	Location of Salt Domes in Northern Jutland	16.08 82 Dr Bo/ke

Figur 8.1. Saltkaverner i Nordjylland (ref. 13)

Tab af brint fra et underjordisk lager vil afhænge meget af de geologiske omstændigheder, men i en egnet lokalitet vil det årlige lagertab være forsvindende.

8.1.2. Lagring af flydende brint

Ved et tryk på 1 bar er kondensationstemperaturen for brint (dugpunktet) 20.3 K eller -253°C . Til kondensation af brint anvendes industrielt en flerettrins proces (Claude-processen), der består af

- 1) kompression af brinten med afledning af den udviklede varmemængde
- 2) Forkøling med flydende kvælstof (-196°C)
- 3) Adiabatisk ekspansion i to trin.

Flydende brint anvendes i dag i udlandet, og i Danmark har der i et mindre omfang været indført flydende brint fra Tyskland. Der er erfaring med flydende brint især i USA (i høj grad NASA) men også i Frankrig (L'Air Liquide) og Tyskland (Messer Griesheim).

Lagringen af flydende brint sker i vakuumisolerede sfæriske tanke. Volumen af de største, der i dag findes hos NASA, er på omkring 4000 m^3 (radius 10 m), men det anses for muligt at konstruere tankene væsentligt større, op til $10\text{-}15.000 \text{ m}^3$ (radius 15 m). Brint i flydende form indeholder 830 gange så mange molekyler pr. volumenenhed som brint ved normalbetingelserne. Et volumen på 15.000 m^3 indeholder derfor omkring $12 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3$. Kapaciteten af et lager baseret på flydende brint er således tilstrækkelig til at imødekomme behov for døgnudjævning fra et værk med en effekt på nogle hundrede MW.

Molekylært brint findes med hensyn til kernespin i to former, nemlig orthobrint, hvor kernerne spin er parallelle, og parabrint, hvor de er antiparallelle. De to former findes i en indbyrdes termisk ligevægt, hvilket betyder, at brint er en blanding af de to former med et temperaturafhængigt blan-

dingsforhold i den stabile tilstand. Ved lave temperaturer er paraformen den stabile, men ved rumtemperatur er der i brint en betydelig del af orthoformen. Ved nedkøling af rumtemperaturbrint i ligevægt til 20 K fastholdes blandingsforholdet til at begynde med, men der vil ske en langsom omdannelse af ortho- til parabrint med en tilhørende frigivelse af energi, varme. Det betyder, at der i flydende brint er "indbygget" en minimum afdampningshastighed, som ikke kan hindres ved forbedret isolation. Inden fortætningen kan brinten katalytisk, ved lav temperatur, omdannes til paraformen, så det omtalte lagertab kan undgås.

De lagre, der har været afprøvet med flydende brint, har vist tab op til 0.3-0.5% pr. døgn for små lagre (op til 50 m³), mens større lagre viser mindre tab, nemlig omkring 0.1% pr. døgn eller mindre.

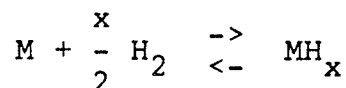
Brint i flydende form giver gode muligheder for en fleksibel transport i tankvogne eller for anvendelse som drivmiddel i transportsektoren om ønskeligt. Flydende brint er specielt af interesse til benyttelse i fly: Massetætheden er 3 gange bedre end ved konventionelt brændsel, hvilket giver en bedre nytte-last og en længere rækkevidde pr. l brændstof. Flydende brint fylder dog 4 gange mere volumenmæssigt end hydrocarbon fuel (ref. 14). Som nævnt anvendes flydende brint allerede i det eksisterende distributionssystem, og såvel i Europa som USA og Japan har der været udført eksperimenter med køretøjer drevet af brint og med forsyning fra en tank med flydende brint.

8.1.3. Lagring i fast form

Ren brint i fast form ved 1 bar har et tripelpunkt på 14 K, hvilket betyder, at fast brint er meget krævende at fremstille og håndtere.

Lagring af brint i fast form kan imidlertid ske ved dannelse af kemiske forbindelser mellem metaller og brint (metalhydri-

der) efter reaktionsligningen



Reaktionen er en ligevægt med stor følsomhed for tryk og temperatur, og den er forbundet med en reaktionsvarme. For næsten alle metaller, og i hvert fald for de metaller der har praktisk interesse, er reaktionen exotherm, d.v.s. at der udvikles varme ved dannelse af hydridet.

Langt den overvejende del af metallerne i det periodiske system danner metalhydrider, hvortil kommer, at utallige legeringer også har den egenskab. Det er dog kun en mindre del, der har egenskaber, der kan have interesse til lagringsformål, især med hensyn til tryk- og temperaturforhold.

Da der er tale om en reaktion mellem gas og metal, har det betydning, at metallet har en stor tilgængelig overflade pr. g (specifikt overfladeareal). Derfor må metallet findes på pulverform inden reaktionen kan forløbe hurtigt. Typisk benyttes metalpulvere med en partikelstørrelse under 50 mikro-m. Når reaktionen starter, sker der det, at gitrene i de to krystallinske former, metal og hydrid, ikke kan akkomodere til hinanden (der er typisk en forskel i densitet mellem de to materialer på 10-20%), og metallet henfalder derfor til en finere form, efterhånden som reaktionen skrider frem. Det samme sker, når reaktionen vendes, og så fremdeles indtil der er opnået en partikelstørrelse, der er lille nok til at undergå den krystallinske transformation uden at sønderdeles yderligere. Forsøg har vist, at den størrelse, hvor der opnås den beskrevne form for stabilitet, ligger omkring 1 mikro-m. Det betyder igen, at der teknologisk skal håndteres meget fine pulvere, men samtidig har partikelhenfaldet en gunstig effekt på reaktionshastighederne (fyldnings- og tømningstid for lageret).

Som nævnt frigøres der ved hydridannelsen varme, og omvendt må den samme varmemængde tilføres ved spaltning af hydridet. Afhængig af hvilket metal eller legering, der er tale om, lig-

ger denne reaktionsenthalpi i området fra 5 til 25% af den nedre forbrændingsvarme for brint. Hvis den derved frigjorte varmemængde ikke finder anvendelse, må det betragtes som et tab, da den samme varmemængde jo skal tilføres ved tømning af lageret. I mange anvendelser er det dog muligt at udnytte reaktionsvarmen, eller der kan alternativt benyttes spildvarme til tømning af lageret. Det sidste er f.eks. tilfældet i en bil, hvor den varme udstødningssgas, som alligevel ikke har nogen anvendelse, udnyttes til spaltning af metalhydridet.

Kinetikken af reaktionerne er ikke udelukkende bestemt af det specifikke overfladeareal men i lige så høj grad af temperaturen. For nogle metaller kan reaktionerne forløbe hurtigt ved stuetemperatur, mens andre kræver højere temperatur, hvis man ønsker en hurtig reaktion.

Lagring af brint i metalhydrid er et højteknologisk område, som drejer sig om samspil mellem kinetik og termodynamik med tryk, temperatur og ligevægt som de betydende parametre.

I Danmark har der gennem 1980'erne været udført en del forskningsarbejde vedrørende lagring af brint i metalhydrid. Arbejdet har foregået på Risø.

De materialer, der har været arbejdet med, er hovedsageligt ren Mg samt legeringen FeTi, som danner den støkiometriske forbindelse FeTiH_2 . Den overvejende del af arbejdet har drejet sig om Mg, først og fremmest fordi dette metal er let ($d = 1.7$), og billigt fordi det er et af de mest almindeligt forekommende metaller i jordskorpen.

De forsøg, der blev udført på Risø, viste, at Mg er et egnet materiale til lagring af brint, idet de nødvendige reaktioner kan forløbe tilstrækkeligt hurtigt. Det sidste havde ikke været dokumenteret tidligere. Der blev yderligere på Risø udført såkaldte cyklingsforsøg, hvor lagringsprocessen blev gentaget på den samme metalmængde men med "frisk" brint i hver cyklus. Formålet var at undersøge, om systemet kunne tåle den stadige gentagelse af processen uden at ændre karakteristika.

Resultaterne af forsøgsserier med op til 10^3 cykler har vist, at der skete et mindre fald i lagerkapacitet, men at fyldnings- og tømningshastigheden ikke blev påvirket. Til praktiske formål ville det betyde, at lagermaterialet måtte udskiftes efter 1000-1500 lagringer.

Metalhydrider er næppe egnede til lagring af energimængder i størrelsesordenen TJ, selv om der har været udført eksperimenter med "peak-shaving" fra elværker i USA. Et problem ved upscaling af mængderne er, at det bliver vanskeligt at sikre effektiv til- og fraførsel af den med reaktionen forbundne varmemængde. Metalhydrider er derimod særdeles egnede til mindre og især mobile lagre som f.eks. i transportsektoren. Her vil metalhydrider formentlig være den bedste kandidat, hvis man forestiller sig, at elværkerne kan levere brint som drivmiddel til forureningsfri transport i storbyer. Der findes i dag flere biler, der kører på brint lagret i metalhydrid som brændsel. I princippet fungerer disse biler ved, at brint til drift af motoren frigøres ved den varme, der kommer fra udstødningsgassen.

Et problem ved lagring af brint i metalhydrider er imidlertid den store vægt samt den høje pris på nogle metalhydrider.

Endelig bør det nævnes, at hydridlagring er tabsfri over tiden, da der ikke sker forandringer med den kemiske forbindelse i metalhydridet.

8.1.4. Sammenligning af lagringsmetoderne

Konventionelle metoder til lagring af brint er afprøvet og i funktion i dag. Afhængig af i hvilken forbindelse lagrene skal benyttes, kan lagrene udformes som store stationære lagersystemer, små stationære lagre eller mobile lagersystemer. De mobile lagersystemer kan benyttes i forbindelse med transportmidler, til distribuering eller som brændstofsreservoir til kraftmaskiner. I alle de nævnte lagersystemer kan brinten lagres enten gasformig eller flydende.

Tabel 8.1 giver en sammenligning af energitætheden for de omtalte lagringsmetoder, og for overskuelighedens skyld drages der også sammenligning med andre kendte energilagre og til-lige med egenskaberne af fossile brændsler.

Tabel 8.1. Energitætheder af forskellige energilagre

	Vægtprocent brint	g brint/ml	kJ/g	kJ/ml
Metalhydrider: MgH_2	7,6	0,101	10,9	15,7
$TiFeH_2$	1,8	0,096	2,7	15,9
$LaNi_5H_7$	1,4	0,089	1,94	12,8
Flydende brint	100	0,07	141	10,0
Tryksat brint, 200 bar	100	0,007	141	2,3
Benzin			47,6	33,4
bly-syre-batteri			0,11-0,18	
Avanceret batteri (Li/MS)			0,5	

Det må endvidere nævnes, at der findes andre principper for lagring af brint. Som eksempel kan der peges på metoder sva-rende til metalhydridprincippet, men med et flydende organisk medie. Disse andre metoder anses dog ikke at kunne få nævne-værdig teknologisk betydning og er derfor ikke medtaget i nær-værende rapport.

Tabel 8.2. viser imidlertid en oversigt over forskellige mu-lige brintlagerprocesser (ref. 17).

Tabel 8.2. Oversigt over mulige brintlagerprocesser (ref. 17)

	Komprimeret brintgaslager			Absorption, metalhydrid		Flydende brintlager	
	underjordisk	lavtryk	højtryk	FeTi	FeTi, MgNi	stor	tankvolumen ----- lille
Driftstryk, bar	100	12	150	3-50	3-50	1.5	1.5
Driftstemperatur, °C	omg.	omg.	omg.	0-80	80-300	-252	-252
Status	kommerciel	kommerciel	kommerciel	udvikling	udvikling	kommerciel	kommerciel
Anvendelse	sæsonlager	middel- kapacitet	korttid eller mobil	lav-middel kapacitet	mobil lager	langtids, højkapacitet	lav kapacitet
Lagerkapacitet, kWh/kW	>1000	<30	<30	<3		>50	
Problemområder	egnet lager diffusionstab		sikkerhed	omkostn. energi- overførsel	kapacitet vægt	sikkerhed fordampnings- tab, sikkerhed	

8.2. Sikkerhed i forbindelse med brintlagring

Den almindelige opfattelse i befolkningen af risikoen ved at omgås og håndtere brint er i almindelighed knyttet til især to forhold, nemlig: 1) Luftskibet "Hindenburg", der benyttede brint som opdriftsmiddel, eksploderede tidligt i dette århundrede. (Det gjorde flere luftskibe, men Hindenburg-ulykken blev optaget på film og har dermed kunnet fæstne sig hos millioner af mennesker). 2) Opfattelsen af brint som en risikofyldt energiform forstærkes af, at mange associerer til brintbomber, når brintenergi nævnes.

Det faktum, at bygas består af ca. 50% brint, viser imidlertid, at brint kan håndteres med lav risiko.

Der har været udført en del eksperimentelt arbejde, bl.a. på Risø, for nærmere at beskrive risikoen ved brintlagre. Konklusionen er, at det ikke er mere risikabelt at håndtere brintlagre end f.eks. lagre af benzin eller LPG.

Der er ikke fundet tilgængelige beskrivelser af risikoen ved underjordisk lagring. Et forhold, man må have i betragtning, er formentlig risikoen for opsivning af brint til jordoverfladen.

I forbindelse med de amerikanske rumprogrammer har der været udført forsøg med antændelse af større mængder frigjort flydende brint. De eksplosioner, der kunne iagttages, var voldsomme, men ikke så store som det kunne frygtes, da den flydende brint på grund af den lave temperatur holdt sig samlet, så der ikke skete den opblanding med luft, som er en forudsætning for en virkelig ødelæggende eksplosion.

Flydende brint er dog formodentlig den form, der må påregnes som mest risikabel, men en nærmere analyse vil være påkrævet med henblik på en mere indgående vurdering.

Ved metalhydrid er der to risikable omstændigheder. Dels brinten selv og dels det fine metalpulver.

Går der hul på et hydridlager, vil der indledningsvis ske en udsivning af brint, men denne frigørelse vil medføre et temperaturfald i hydridmassen, som så vil mindske brintfrigørelses-hastigheden (reaktionshastigheden og ligevægtstrykket falder med temperaturen). Der er således indbygget en slags bremse i systemet ved den nævnte type af uheld.

Forsøg udført af Risø med antændelse af fint Mg- og MgH_2 -pulver (Mg har en overordentlig stor affinitet til ilt) viste, at begge pulvere brænder i luft, men at forbrændingen forløber roligt på overfladen af pulveret så længe pulvermængden lades i ro, og så længe branden ikke søges slukket med vand. Blæses der på pulveret, eller sprøjtes der vand på, sker der en eksplosionsagtig udvikling, som formodentlig ville kunne efterfølges af en støvekspllosion. Men forsøgene har vist, at metalhydrid er en sikker måde at lagre hydrogen på, og at viden om materialerne er afgørende for en sikker håndtering.

8.3. Økonomi

8.3.1. Energibalance

Ved tryksætning af brint med henblik på lagring af gassen i trykflasker eller underjordiske kaverne vil der ske en temperaturstigning med efterfølgende varmetab på grund af temperaturudledning. Til kompression af brint kræves 0.031 kWh for at komprimere volumenet til 1/10 af det oprindelige (ca. 3% af brintens brændværdi).

Det er ligeledes refereret, at der kræves 8-10% af brints lave brændværdi eller 7-9% af den høje for at komprimere brint fra 1 bar til 150-200 bar (ref. 16).

Tab over tiden vil afhænge helt af den pågældende kaverne.

Ved fortætning af brint til flydende form vil der være tale om et varmetab i de forskellige procestrin på samlet 20-30% af forbrændingsvarmen. Der vil yderligere ske et tab over tiden

på ca. 0.1% pr. døgn, afhængig af lagerstørrelse.

Kondensering af brint kræver teoretisk 3.3 kWh pr. kg brint. Små kondensatorer (mindre end 2 tons pr. dag) kræver 25 kWh/kg, mens større kondensatorer (flere tusind tons pr. dag) bruger mindre end 10 kWh/kg. Omkostningerne til kondensering afhænger således meget af mængden af brint, der skal kondenseres samt af elprisen.

De totale energitab fra et kondenseringsanlæg kan være betydelige på grund af fordampning, helt op til 30-70%. De største tab forekommer under behandlingen af brinten på anlægget samt under transport til og fra anlægget. Tabet er dog blevet mindre efter udviklingen af lagertanke til flydende brint. Samtidig gælder det, at jo større tankene er, jo mindre bliver tabet. Tabet kan være helt ned til 0.02% pr. dag (ref. 19).

Ved hydridlagring sker der, afhængig af metallet, et varmetab ved lagringen på 5-25% af forbrændingsvarmen. Metalhydrid er derudover tabsfri over tiden.

8.3.2. Økonomiske forhold

Den energimængde, der kan lagres i et volumen brint i forhold til samme volumen naturgas, er bestemt af forholdet mellem de volumetriske brændværdier. Set ud fra dette synspunkt er den samme lagerudformning 3 gange dyrere for brint end for naturgas. Omkostningerne ved forskellige lagersystemer er blevet undersøgt, og følgende konklusioner kan drages på basis af dette (ref. 17):

- 1) Underjordiske brintlagre er de mest økonomiske uafhængig af anvendelsesformålet.
- 2) Lagring af brint i trykbeholdere er den mest økonomiske lagringsform ovenjords, når lagringstiden er under 30 timer. En trykbeholder er velegnet som lager i alle korttids lagersystemer.

- 3) Lagring af flydende brint er den mest økonomiske lagringsform overjordisk, hvis lagringsperioden er over 30 timer.
- 4) Det er endnu uvist, om de nyeste former for brintlagre (metalhydrid eller kryoadsorber systemer) er mere favorable ud fra såvel et teknisk som økonomisk synspunkt.

Pålidelige økonomidata er vanskelige at finde. Med hensyn til lagring i undergrundskaverne findes der tilgængelige priser i forbindelse med lagring af naturgas.

En kaverne på $300-500.000 \text{ m}^3$ vil kunne etableres for 50 mio. kr. Procesudstyr vil koste mellem 100 og 150 mio. kr. (udstyr til $150.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$).

Priserne kan nedsættes væsentligt ved indkøb af brugt procesudstyr. Brugt udstyr kan fås til den halve pris, og levetiden er ikke væsentligt reduceret herved, men driftssikkerheden bliver reduceret en anelse.

Udskylningsanlæg fra eksisterende naturgaslagre kan benyttes igen. Et sådant anlæg har en nutidsværdi på omkring 120 mio. kr.

Produktionsomkostningerne for flydende brint ved en produktionskapacitet på 12 tons pr. dag er 3.63 \$/kg fordelt på energiomkostninger 0.51 \$/kg, kondensering 0.77 \$/kg, tilførsel 0.95 \$/kg, og omkostninger til 40 m^3 lagertank 1.40 \$/kg (ref. 19).

8.4. Sammenfatning i forhold til ellagring i Danmark

I forbindelse med lagring af brint i stor skala, hvilket vil være tilfældet, hvis brint skal benyttes som ellager i lavlastperioder for elværkerne, er salthorste et attraktivt lagringsmedie. Salthorstene er store og kan rumme energimængder, der er rigelig store for danske forhold. Derudover er der i dag erfaring i Danmark med lagring af naturgas i salthorste.

Lageret er tæt overfor naturgas, og der er ikke registreret nogle energitab. Ligeledes er der fra brintlageret i Teeside i England ikke registreret nogle tab, og lageret har virket tilfredsstillende i en årrække.

Ydermere er specielt Danmark rigt på salthorste, der kan være egnede til lagre, dog findes der flest i Nordjylland. Det skulle imidlertid ikke være vanskeligt at finde egnede porøsiteter i dybere jordlag på Sjælland, omkostningerne vil dog blive højere.

Endeligt har undergrundslagre set ud fra et økonomisk synspunkt vist sig at være den mest attraktive form for lager.

I forbindelse med lagring af brint i mindre skala kan metalhydrider være aktuelle.

Nøgletal:

Lagerform	: Salthorst
Lagertab	: 0-1%
Pris	: 300 kr./Nm ³
Elvirkningsgrad ved kompression (10-160 bar):	96%

9. ANVENDELSE AF BRINT

Der findes i dag mange muligheder for udnyttelsen af brint som energibærere. Af eksempler kan nævnes følgende (ref. 7):

- Brint kan i princippet erstatte naturgas og kan transporteres i eksisterende naturgasnet. Brint kan således benyttes til opvarmning i private hjem samt til drivstof til diverse udstyr privat og kommercielt. Der kan imidlertid være flere problemer med tætheden i naturgasnet, og det er derfor uvist, om brint kan transporteres i naturgasnettet.
- Brint kan erstatte benzin, diesel, jet fuel, naturgas og propan. Det er således muligt at afbrænde brint i stedet for traditionelle brændsler til benyttelse i tog, biler, fly, traktorer og andre transportmidler.
- Brint kan erstatte diesel, kul etc. og benyttes ved drift af kraftanlæg og til elforsyning.

Set fra et teknisk synspunkt findes der allerede i dag flere teknikker, hvor brint kan anvendes, såvel i industri, husholdning, kraftværksanlæg som transportsektoren. Flertallet af disse teknikker er baseret på principper, der har været kendt længe.

I nærværende rapport er specielt omdannelsen af brint til elektricitet genstand for interesse, hvorfor dette emne vil blive behandlet mere detaljeret i det følgende. Der vil her specielt blive lagt vægt på brændselsceller, der er en oplagt mulighed for omdannelse af brint til elektricitet. Anvendelsen af brint til transportformål vil dog også blive omtalt.

9.1. Omdannelse af brint til elektricitet

Udover at brint kan benyttes til opvarmningsformål, kan brint som nævnt også omdannes til elektricitet. Dette kan foregå indirekte via kraftvarmeprocesser eller direkte ved elektrokemiske metoder.

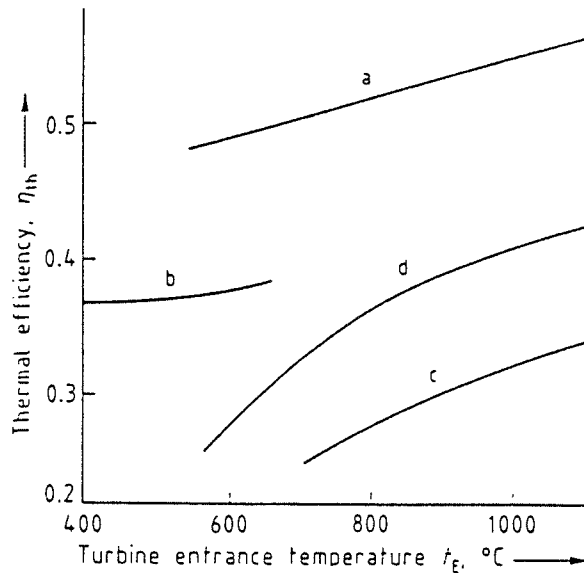
9.1.1. Kraftvarmeprocesser

Følgende kraftvarmeprocesser er velegnede til omdannelse af brint til elektricitet:

- 1) konventionelle dampturbiner med brintdrevne brændere
- 2) åbne brint-luft gasturbiner
- 3) brint-ilt dampturbiner (HOS).

I perioden 1980-1983 blev der udført et EF-projekt af Rolls-Royce i England, hvor der blev brugt flydende brint som brændsel i en gasturbine (ref. 16). Turbinerne viste sig at kunne modificeres for flydende brintdrift, og resultatet var en forøget effektivitet og en større effekt. Effektiviteten kunne således komme over 50%, hvis der blev varmevekslet.

Den termiske effektivitet for forskellige brintdrevne kraftværksprocesser op til 100 MW fremgår af nedenstående figur 9.1 (ref. 17). Effektiviteten er givet som en funktion af indgangstemperaturen i turbinen. En brint-ilt enhed (HOS) med kondensation (a) har ved fuld last en effektivitet på 52%. Denne type er bedst egnet som spinning reserve. Hvis effekten momentant skal forhøjes på fossilt fyrede grundlast- eller middellastanlæg, kan en HOS-enhed integreres i systemet. Brint-ilt generatorer (HOS) er tidligere omtalt i kapitel 5.1 "Udenlandske forskningsprojekter", idet DLR kører forsøg med denne type på 2 forskellige kraftværker.



Figur 9.1. Termisk effektivitet ved forskellige brintfyrede kraftværksprocesser (ref. 17):

- a) Brint-ilt generator (HOS)
- b) Konventionel brintgenerator
- c) Brintgenerator med gasturbine
- d) Brintgenerator med gasturbine, forbedret design

9.1.2. Elektrokemiske processer (brændselsceller)

Brændselsceller er elektrokemiske systemer, der konverterer den kemiske energi i brændstoffet til elektricitet.

Allerede i 1946 fik F. Bacon ideen at lagre energi ved først at producere gasser ved elektrolyse, derefter lagre gasserne og siden hen benytte gasserne igen i den samme produktionsenhed til at producere strøm. Tanken var således en reversibel brændselscelle (ref. 26). Denne tanke har stadig perspektiver, bl.a. hvor brændselscellen placeres decentralt med det formål at producere varme.

Brint kan omdannes til el ved hjælp af brændselsceller med en meget højere effektivitet end ved et termisk kraftværk baseret på fossile brændsler. Effektiviteten for el produceret på et termisk kraftværk ligger i området 35-38%, mens brændselsceller i dag i praksis har en effektivitet på 50-70%. (Effektivi-

teten ligger i teorien på 70-80% (ref. 16).) I de avancerede brændselsceller, der nu er under udvikling, forventes en total effektivitet på 80-90% (ref. 20). Brændselsceller i størrelsesordenen nogle få hundrede Watt til flere MW er allerede blevet demonstreret, og i nogle få tilfælde er brændselscellerne i drift.

Der findes 5 typer af brændselsceller under udvikling:

- alkaliske brændselsceller (AFC)
- fosforsyre brændselsceller (PAFC)
- smeltet karbonat brændselsceller (MCFC)
- fast polymer brændselsceller (SPFC)
- fast oxid brændselsceller (SOFC).

De brændselsceller, der specielt er under udvikling og forventes benyttet til kommerciel brug, er fosforsyrecellerne, karbonatcellerne og fastoxidcellerne.

I et brændselscellesystem produceres der elektricitet og varme ved tilførsel af brændsel og luft. En del af varmen kan benyttes på et senere tidspunkt, f.eks. til fjernvarme eller til eludvikling i en termisk proces, mens resten af varmen er spildvarme. Eksempelvis kan et anlæg baseret på fosforsyrebrændselsceller producere 40% elektricitet, men samtidig også 40% varme på et temperaturniveau, der er passende til fjernvarmesystemer (ref. 16).

En brændselscelle producerer som nævnt el ved en elektrokemisk proces og ikke ved traditionel forbrænding. Dette medfører, at miljøbelastningen bliver minimal. Der kommer ingen emission af NO_x eller partikler og kun en mindre mængde SO_2 -udslip og CO_2 -udslip afhængig af brændslet.

ALKALISK BRÆNDSELSCELLE (AFC)

Den alkaliske brændselscelle bruger ren brint som brændsel og virker ved ca. 100°C (ref. 25).

Den alkaliske brændselscelle har ved 25°C og 1 bar en celledspænding på 1.23 V, hvorved den totale effektivitet bliver 57%.

Alkaliske brændselsceller benyttes til rumfart samt til specielle formål som relæstationer, reservelast og til militære formål. De har en lav specifik masse (7.2 kg/kW) og en lang levetid, men er meget kostbare (1500 \$/kW) (ref. 17).

FOSFORSYRE BRÆNDELSCELLE (PAFC)

Fosforsyre brændselscellen kan bruge brint med lav CO-koncentration som brændsel og virker ved ca. 200°C .

Fosforsyre brændselscellen er den, der nok er tættest på kommerciel benyttelse. Et anlæg på 4.5 MW er blevet demonstreret i Japan. Cellens spænding er ved 190°C og 200 mA/cm^2 målt til 0.7 V (ref. 16).

I USA afprøves flere fosforsyre brændselsceller på 40 kW i huse og lejligheder, hvor de opnår kombinerede effektiviteter (termisk og el) på op til 80%. Det forventes, at en videre udvikling kan bringe effektiviteterne op på 85-90% (ref. 20). En brændselscelle på størrelse med et air-conditions anlæg kan opfylde alle elektriske krav i en almindelig husholdning.

De seneste modeller af fosforsyre brændselsceller til 200 kW-kraftvarmeanlæg, der er blevet markedsført af I.F.C. og Fuji Electric Company, er næsten på kommercielt acceptabelt prisniveau, specielt for det japanske marked, hvor brændselspriserne er høje. Selvom fosforsyre brændselscellerne er på et højt udviklingsniveau set ud fra et teknisk synspunkt, er kapitalomkostningerne stadig en forhindring, der skal overvindes. Større produktionsserier kan imidlertid bringe omkostningerne ned på et acceptabelt niveau (ref. 23).

Sønderjyllands Højspændingsværk og Naturgas Syd har bestilt en 200 kW PAFC-brændselscelle i USA (ref. 25) som demonstrationsprojekt.

SMELTET KARBONAT BRÆNDELSCELLE (MCFC)

Smeltet karbonat brændselsceller kan både bruge brint med CO som brændsel samt naturgas og kulgas efter intern reformering (ref. 25).

Karbonat brændselscellen opererer ved en temperatur på omkring 650°C og har en høj elvirkningsgrad på ca. 60%. Driftstemperaturen er så høj, at der også produceres varme, der kan udnyttes f.eks. i en dampturbine for således at forhøje elproduktionen, eller til fjernvarme. Ved udnyttelse af spildvarmen kan den totale effektivitet forøges med 25-30% (ref. 16). De væsentligste problemer ved MCFC-brændselscellen er pris og holdbarhed.

ELKRAFT afprøver for tiden det første MCFC-anlæg med en effekt på 7 kW.

FASTPOLYMER-PROTONLEDER BRÆNDELSCELLE (SPFC)

SPFC-brændselsceller bruger ren brint som brændsel og virker i lavtemperaturområdet (ca. 100°C).

Fastpolymer brændselscellen er afprøvet i anlæg på nogle få kW i rumfartsindustrien. Materialeomkostningerne til disse celler er imidlertid så høje, at fastpolymer brændselscellerne kun vil være realistiske i specielle tilfælde, hvor økonomien ikke har nogen betydning (ref. 16). Elvirkningsgraden er ca. 40%.

FASTOXID BRÆNDELSCELLE (SOFC)

Fastoxid brændselsceller kan bruge brint og kulgas som brændsel, ligesom der er gode muligheder for fyring med naturgas og biomasse direkte uden forudgående omdannelse. SOFC er en højtemperaturbrændselscelle, der virker ved ca. 1000°C.

Fastoxid brændselscellen er blevet afprøvet i laboratorier med et output på flere kW. Effektiviteten ved direkte elproduktion er ca. 40%, men hvis de overskydende varme gasser udnyttes i

en gas- og dampturbine, kan den totale effektivitet for el forøges til 60% (ref. 16).

Højtemperaturbrændselsceller har ydermere den fordel, at de kan udnyttes til kraftvarmeproduktion.

I Danmark er der iværksat et storstilet program til udvikling af en avanceret fastoxid brændselscelle (ref. 25). Deltagende parter i projektet er Risø (Afdelingen for Materialeforskning), ERL (Innovision A/S), Odense Universitets Kemiske Institut, Fysisk-kemisk Institut og Fysisk Laboratorium III (DTH), Kemisk Laboratorium A (DTH) og Haldor Topsøe A/S.

Der satses specielt på at udvikle en brændselscelle med en høj elvirkningsgrad. SOFC-brændselscellen skal derfor laves af faste keramiske materialer, der kan klare den høje temperatur på omkring 1000°C i lang tid. Det har således været nødvendigt selv at udvikle nye materialer for at opnå den ønskede holdbarhed.

De foreløbige resultater fra arbejdet med SOFC-brændselscellen har indtil nu været meget lovende. Hvis man beslutter sig til den udviklede prototypefase og en derpå følgende udvikling, vil det være muligt at producere el fra en dansk fastoxid brændselscelle i kW-størrelsen i slutningen af 1990'erne. Hvis der viser sig kommerciel interesse, kan der startes en dansk SOFC-produktion indenfor en halv snes år. Et brændselscelleanlæg vil til den tid kunne opføres for 5-8000 kr. pr. installeret kW, hvilket er lidt billigere end de gas- og dampturbineanlæg, som kraftværkerne bruger i dag.

9.1.3. Sammenligning af brændselscelletyperne

Omstående tabel angiver data for de forskellige brændselscellesystemer.

Tabel 9.1. Data for forskellige brændselscelletyper

Brændselscelle	--- Driftsforhold ---		---- Tilførsel ----		Eleffektivitet (%)
	Temp. (°C)	Tryk (bar)	Brændsel	Oxidant	
Alkalisk	50-80	1-4	H ₂	O ₂ , luft	50
Fosforsyre	180-210	8	NG, nafta, methanol	luft	41
Fastpolymer	80-100	1-7	H ₂	O ₂ , luft	50
Karbonat	600-800	7	NG	luft	57
Fastoxid	1000-2000	varierer	H ₂ , CO	luft	60

Teoretisk skulle det være muligt at bygge brændselsceller med en effektivitet på 80-90% (ref. 23). Der er allerede demonstreret brændselsceller med en elektrisk effektivitet på 40% og med 45% varmegenvinding, og i praksis skulle det uden problemer være muligt at opnå en elektrisk effektivitet på 65%.

Brændselscellerne fortsætter en hurtig udvikling med fosforsyre brændselscellen førende i udvikling. Den er nu ved at blive gjort kommerciel. Som ved enhver anden ny teknologi har de første skridt i udviklingen gået meget langsomt med den nødvendige uddannelse af potentielle kunder vedrørende sikkerhed og levedygtighed af komponenterne. Generelt har de gas- og elsekskaber, der har deltaget i forsøg med brændselsceller, været effektive til at udvikle mere avanceret udstyr (ref. 23).

9.1.4. Økonomiske forhold for brændselsceller

Brændselsceller er i dag temmelig kostbare, da teknologien endnu er på udviklingsstadiet, og en masseproduktion ikke er i gang.

I dag koster en prototypebrændselscelle omkring 2000-3000 \$/kW. Prisen forventes at komme ned på 350 \$/kW ved en startende masseproduktion (ref. 20). Som tidligere nævnt forventes et fastoxidbrændselscelleanlæg om en halv snes år at kunne produceres for 5-8000 kr. pr. installeret kW.

Andre kilder nævner tilsvarende priser. I ref. 87 angives således en kapitalomkostning på 1430 DM/kW og en drifts- og vedligeholdelsesomkostning på 7½% af investeringen årligt.

9.2. Udnyttelse af brint til transportsektoren

Brint kan benyttes som brændstof i forbrændingsmotorer og har her større effektivitet end benzin, da brint brænder bedre på en rig luftblanding og tillader et højere kompressionsforhold. Data fra forskellige eksperimenter har påvist en 15-20% bedre effektivitet for forbrænding af brint (ref. 16). I praksis afhænger effektiviteten af brændslet, af luft/brændstofblandingen, hvor godt motoren er optimeret, om der benyttes flydende eller gasformig brint som brændstof, hvorledes brændstofinjektionen er udformet etc.

Motorens effekt er proportional med den volumetriske brændværdi af luft/gasblandingen. Ved en temperatur tæt på omgivelserne fylder gasformig brint meget mere end kondenseret benzin, hvilket betyder, at den støkiometriske brint/luftblanding har et 30% lavere teoretisk output end en tilsvarende benzin/luftblanding. Dette er imidlertid ikke tilfældet for flydende brint, hvor denne reduktion kan elimineres. Der kan tværtimod forventes en kraftforøgelse på 17%, hvis den flydende brint indsprøjtes i cylinderen, efter at luftindtagsventilen er lukket tæt på det øvre døde punkt og under højt tryk.

Der er 3 vigtige parametre at tage hensyn til i forbindelse med valg af brændsel til forbrændingsmotorer: effektivitet, NO_x-emissioner og motorkraft. Man er dog nødt til at gå på kompromis mellem disse parametre, idet en mager blanding giver en høj effektivitet, lave NO_x-emissioner, men også lav motor-

kraft.

En motor med brint som brændsel kan indstilles således, at dens emission af NO_x er 200 gange mindre end ved almindelige transportmidler (ref. 7). En praktisk måde at kontrollere forbrændingstemperaturen på er at indsprøjte vand i brint-luftblandingen. Herved vil der kun udblæses vanddampe fra den brintdrevne motor, d.v.s. ingen luftforurening og ingen syreregn.

Ved landevejskørsel har brintbaserede biler vist en effektivitet, der er 20% bedre end benzindrevne biler, mens brintbilen ved bykørsel har en effektivitet, der er helt op til 50% bedre end benzinbilens.

Mercedes-Benz har i 4 år afprøvet brintdrevne biler i Berlin. Brinten leveres fra Berlin gasværk. Bilerne er afprøvet til 130 km/h, men vil kunne køre 180 km/h. Bilerne er afprøvet over 6000 km (ref. 18).

Mazda vil have en prototype til en brintdrevet bil på den kommende motormesse i Tokyo i efteråret 1991. Mazda regner med en serieproduktion af denne brintbil fra 1995.

9.3. Sammenfatning i forhold til anvendelse af brint i Danmark

Brint har i dag mange anvendelsesmuligheder. Af væsentlige områder kan nævnes husholdning, opvarmning, elektricitet og trafik. Af speciel interesse i denne rapport er omdannelsen til elektricitet, idet systemet der betragtes i hovedpunkterne er el-brintlagring-el. I den forbindelse har specielt brændselsceller vakt interesse, men andre anvendelser af brint til elformål kan så afgjort også have interesse, heriblandt brint-ilt generatorer (HOS), der kan virke som spinning reserve (en effekt på 40 MW kan opnås indenfor 1 sek).

Til udregning af brintsystemet i scenarierne er imidlertid kun benyttet brændselscellen. Fastoxid brændselscellen er den

brændselscelle, der er benyttet, da den kan opnå en høj effektivitet.

Derudover er det denne brændselscelle (SOFC), der er igangsat målrettet forskning på i Danmark, med henblik på udvikling til kommerciel brug indenfor 10-15 år.

Nøgletal:

Elomdannelseseteknologi	: Fastoxid brændselscelle
Driftstemperatur	: ca. 1000°C
El-effektivitet	: 60% nutid, 65% fremtid
Investering	: 5400 kr./kW
Drifts- og vedligeholdelsesomkostninger årligt:	405 kr./kW

10. SYSTEMER MED BRINT SOM ENERGIBÆRER

Der er på nuværende tidspunkt foretaget en del studier vedrørende benyttelsen af brint i eksisterende energisystemer. Der er således foretaget teoretiske studier og udregninger, men også demonstrationsanlæg er nu ved at blive bygget. Mindre private energisystemer med brint har endog været igang i flere år. I det følgende vil nogle af de såvel teoretiske studier som de igangværende demo-projekter blive beskrevet.

10.1. Teoretiske studier

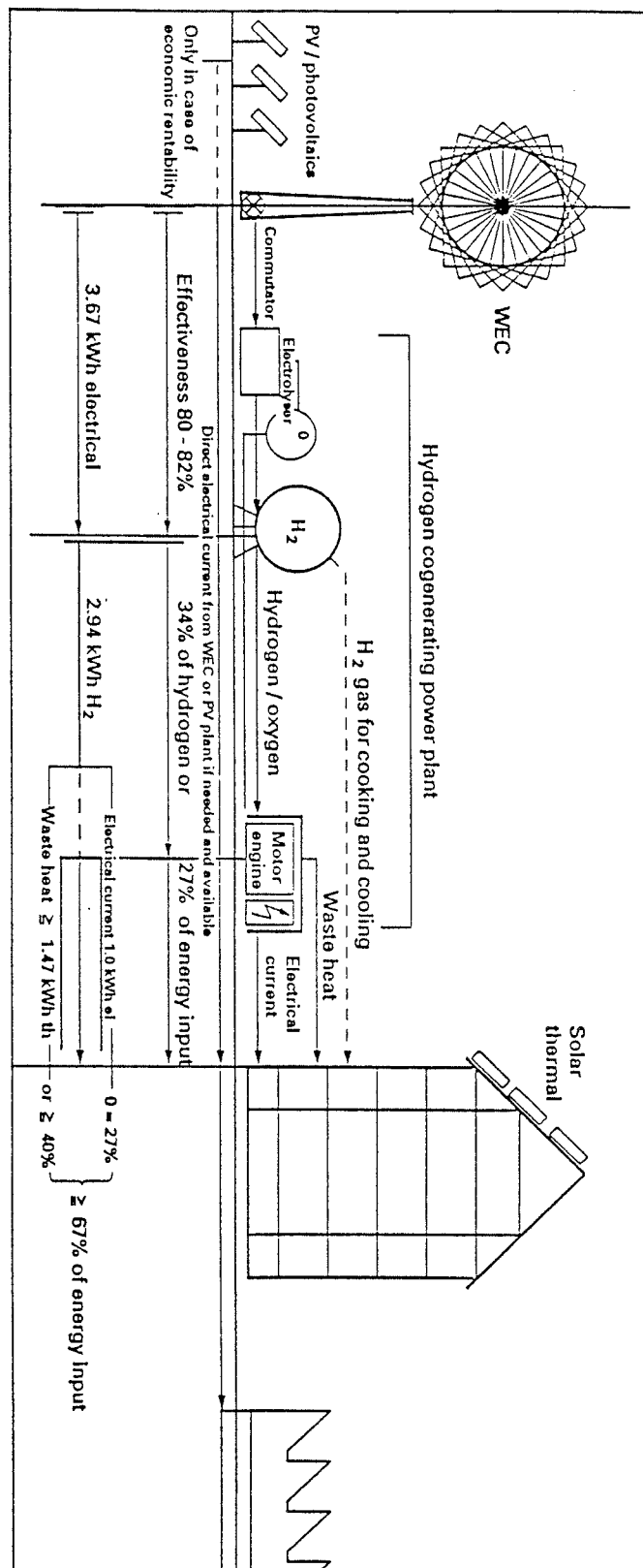
SOL-VIND-BRINT ENERGISYSTEM

Der er foretaget en undersøgelse af sol-vind-brint energisystemer sammenlignet med andre energisystemer (ref. 5). Udformningen af et energisystem baseret på sol-vind-brint er vist på figur 10.1.

Et vind-brint varmesystem har vist sig at være det billigste energiforsyningssystem i Midt- og Nordeuropa. Energivirkningsgraden ved et vind-brint anlæg er ca. 27%, men stiger til 65% eller derover ved udnyttelse af spildvarme.

Det eksisterende gasnet kan til en begyndelse anvendes som distributionsnet for vindbaseret brint. Ideen i projektet er, at der til en start kan opbygges decentraliserede "isle-nets", der samtidig kan fungere som eksperimentelle projekter til at verificere hele systemet.

Regioner med vindhastigheder over 6 m/s i årssnit viser sig at være favorable til at opstarte vind-brint anlæg, også selvom der ikke umiddelbart er spildvarme til rådighed.



Figur 10.1. Sol-vind-brint systemet

Eksempelvis kan nævnes, at EF's kystlinier ved Nordsøen og Atlanterhavet er ca. 4700 km. Lokaltiteter med vindhastigheder over 5 m/s kan findes overalt langs disse kystlinier.

Det er ligeledes muligt at producere brint på centrale anlæg i specielt solrige eller blæsende områder som f.eks. Sahara. Ulempen ved dette er imidlertid tilfælde med terrorkonflikter som f.eks. Mellemøsten.

Ved masseproduktion af vind-brint anlæg forventes en pris på 2 Pfennig pr. kWh.

Industrielle anlæg og fabrikker kan med fornuft forsynes ved hjælp af brintanlæg. Hvis systemet forsynes ved 50% brint, vil energiprisen blive 13.5 Pfennig pr. kWh. Dette er imidlertid uden udnyttelse af overskudsvarmen.

VANDKRAFT-BRINT SYSTEMER

Vandkraftværker udnytter i dag kun en del af vandets hydrauliske energi på grund af hydrologiske og økonomiske forhold. En mulighed for at forhøje effektiviteten af et vandkraftværk er at omdanne den mængde vand, der er i overskud energimæssigt set til brint ved elektrolyse (ref. 27). Brinten kan senere hen omdannes til elektricitet via gasturbiner eller brændselsceller. Den elektricitet, der bliver produceret i lavlastperioder eller i perioder med store vandmængder, kan således lagres i form af brint, og senere under spidslastforhold kan brinten atter omdannes til el.

En fordel ved dette energisystem er, at den ressource, der skal benyttes til produktion af brint (vand), er til stede direkte på anlægspladsen.

EF satser nu 150 mio. kr. på en ny bølgekraftværkstype, der er stationær. Bølgerne opsamles i en "luftkompressionscylinder", som driver en turbine med generator. Kraftstationen kan direkte omdanne bølgerne til brint, der kan transporteres i rørledninger. For at producere 1000 MW må der beregnes en kyststræk-

ning på 5 mil. EF peger her først og fremmest på Storbritanien, Skotland, Irland, Frankrig, Spanien, Portugal og Norge.

10.2. Demonstrationsanlæg

SOLAR HYDROGEN-PROJEKTET I NEUNBURG (ref. 15, ref. 24)

Et af de største tyske elværker, Bayernwerk i München, har sammen med 4 industriforetagender, BMW, Linde, MBB og Siemens etableret "Solar-Wasserstoff-Bayern (SWB). Tæt ved Neunburg vorm Wald i det østlige Bayern demonstrerer SWB nu et brint-energisystem baseret på integreret solteknologi.

Følgende teknologier vil blive afprøvet:

- Lagring og håndtering af brint og brint/methanblandinger (5000 Nm³ brinttank).
- Alkaliske og fosfor-brændselsceller.
- Katalytiske forbrændingsovne.
- Gasmaskine generator system.
- Brintfyr.
- Demonstration af brintdrevne transportmidler i forbindelse med påfyldningsstationer.

Anlægget er som nævnt beliggende nær Neunburg vorm Wald i Bayern og menes at være repræsentativ for udnyttelsen af solenergi i Centraleuropa. Anlægsarealet er på nuværende tidspunkt omkring 50.000 m², men det er muligt at udvide det med yderligere 30.000 m². Hele anlægget omhandler solcellepaneler med forskellige siliciumteknologier, der tilsvarende elkraftsvilkår, avancerede vandelektrolyseapparater med forskellige teknikker, behandling og efterfølgende lagring af tryksat gasformig brint og ilt og derudover gasbrændere og brændselsceller baseret på forskellige teknologier. Der vil også blive etableret en påfyldningsstation for flydende brint til forsøgsbiler, der kan køre på såvel benzin som brint. Den flydende brint vil blive indkøbt udenfor anlægget, da installation

af en kondensator med så lille kapacitet, som det var nødvendigt, ikke syntes økonomisk fornuftigt.

Lagringen af brint og ilt fungerer som en buffer i hele anlægget, således at man kan demonstrere en uafhængighed mellem energigenerering og forbrug.

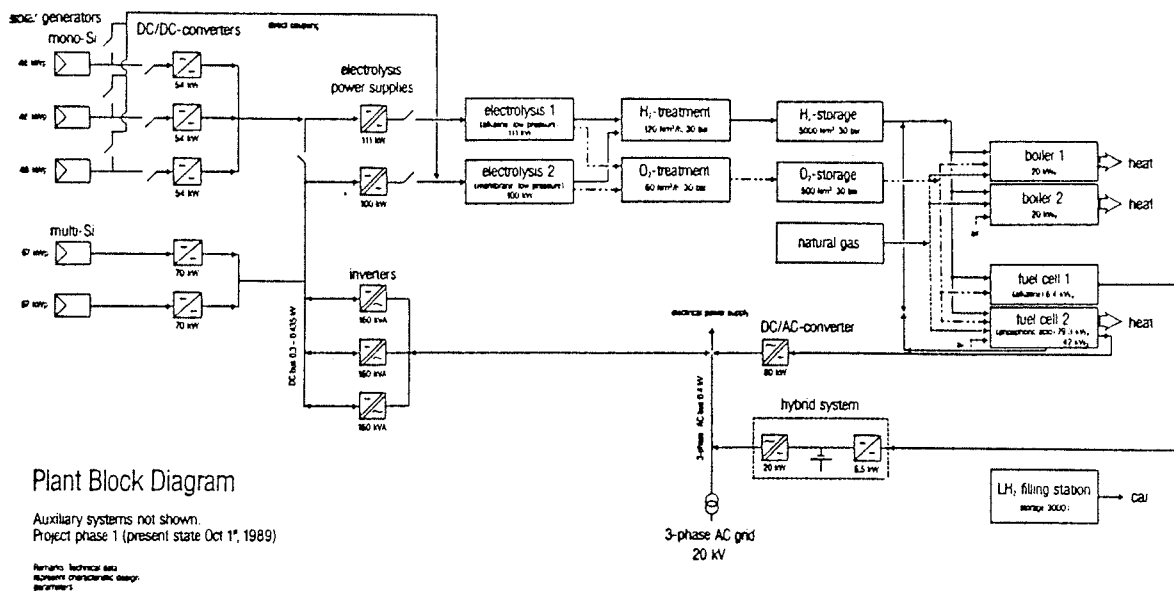
Der er også installeret en naturgasledning til anlægget, således at energiforbruget kan dækkes enten af naturgas eller brint eller af en blanding af begge gasser.

Omkring 20% af den mængde ilt, der bliver produceret ved elektrolysen, bliver lagret og senere brugt som oxidant sammen med luften. Man kan således blande ilt og luft i forskellige forhold. Den mængde ilt, der ikke kan benyttes, slippes ud i atmosfæren.

Projektkostningerne er på omkring $50 \cdot 10^6$ DM ($33 \cdot 10^6$ DM til anlæg, $12 \cdot 10^6$ DM til personale, $5 \cdot 10^6$ DM til infrastruktur).

Anlægsdata	: Solgenerator-500 kW el fra forskellige moduler
Solceller	: Total overfladeareal på 7000 m^2
Elektrolyseenheder	: 100 kW el konventionel KOH-elektrolyse 100 kW el zero gap KOH/NaOH-elektrolyse 80 kW el fastpolymer membran-elektrolyse
Lager	: 5000 m^3 brint ved 30 bar 500 m^3 ilt ved 30 bar
Brændselsceller	: 6-8 kW el alkalisk type 80 kW el fosforsyre type
Katalytisk forbrænding:	4 kW termisk
Gaskedel	: 20 kW termisk

Omstående figur 10.2 viser et blokdiagram over anlægget.



Figur 10.2. Blokdiagram (Neunburg)

Meningen med opbygning af anlægget er at skaffe oplysninger af såvel teknisk som økonomisk art vedrørende forskellige sol/brintteknologier. Resultaterne af forsøgsprogrammet vil kunne benyttes ved dimensionering og opbygning af fremtidige storskala anlæg baseret på solenergi sammen med brint som energibærere. Udover solcellepaneler og vandelektrolyse skal følgende teknikker afprøves: Benyttelse af brændselsceller til såvel stationær som mobil elgenerator, forskellige forbrændingsteknikker til opvarmningsformål samt en påfyldningsstation med flydende brint til drivstof til personbiler.

Demonstrationsanlægget vil være i drift i dagtimerne på hverdage. Det forventes dog også, at man skal køre specielle forsøg over 24 timers perioder.

Milepæle i projektet:

- Informationscenter åbnede 10 oktober 1989 (aftaler kan foretages på tlf.: 09672 1882).

- Driftsbygningen var færdig i august 1989. Der bygges nu el- og procesanlæg.
- Solcellepanelerne er færdige og forbundet til driftsbygningen.
- Januar 1990: Start på forbindelse af solcellegenereret strøm til 3-fase nettet.
- Marts 1990: Start på hoved-proceskontrolsystemet samt gasproduktion, gasbehandling, gaslagring samt de 2 kedler.
- August 1990: Start på indførsel af de 2 brændselsceller.
- Januar 1991: Start på opbygning af påfyldningsstation med flydende brint.
- Udførsel af testprogrammet så snart ovennævnte milepæle er fuldendt.
- 31. december: Slut på projektfase 1.

Projektet forventes at fortsætte efter fase 1. I en efterfølgende fase 2 vil man afprøve katalytiske brændere, flere brændselscelleteknologier, der endnu ikke er afprøvet, samt anderledes solcellepaneler.

HYDROGEN CITY

Hydrogen City er navnet på en modelby, der skal bygges nu (ref. 10). Byen vil have 200.000 indbyggere. Byen skal producere og sælge brint og skal til alle energiformål bruge brint, alt. vedvarende energi. Byen forventes at bruge 17.5 bio. kWh årligt, 10 kW per capita. Vandforsyningen forventes at være mere end 10 bio. gallons årligt.

Af mindre energisystemer kan nævnes følgende:

I 1979 byggede R.E. Billings et hus i Independence, Missouri, hvor energiforsyningen, inkl. brændstof til bil og traktor, var baseret på brint (ref. 17). Den primære energikilde var vandkraft, og lagringen foregik i metalhydrider. Solenergi blev benyttet som en subsidiær energikilde til opvarmningsformål.

O. Tegstrøm har omdannet energiforsyningen til sit hus i Harnösund, Sverige, og til sin bil til brint (ref. 18). Vind er den primære energikilde, der omsættes til el i en 55 kW-vindmølle. Ved elektrolyse omdannes elektriciteten til brint. Den producerede brint bliver lagret i metalhydrid.

På en fuld tank brint som drivstof på bilen kan Tegstrøm køre 200 km. Brint lagres her i en lagertank. Demoprojektet i Harnösund blev lukket i 1988 efter 2 års drift. Projektet har kostet 280.000 DM til installationer på hus og bil, men ved en masseproduktion vil hele systemet koste 90.000 DM inkl. vindmølle, bil etc.

Markus Friedli i Zollbrück ved Bern, Schweiz, har forsynet sit eget hus med solceller (ref. 18). Solcellerne producerer strøm, der benyttes til fremstilling af brint og ilt ved elektrolyse. Brinten lagres i en tryktank. Brinten benyttes til komfur og vaskemaskine etc.

I Dietmarschen, Slesvig-Holstein, er det tanken at bygge 3 huse, der forsynes med el fra en vindmølle (ref. 18). El omsættes til brint via et elektrolyseapparat placeret i kælderen i et af husene. Brint ledes i røret til de andre huse, hvor det bruges til opvarmning og madlavning. Derudover skal der oprettes en tankstation til brint som drivstof til private biler. Hertil kommer et lokalt kraftværk, der skal producere varme og strøm på basis af brinten. Projektet er endnu ikke realiseret, da det har finansielle problemer. Et byggefirma vil dog støtte projektet ved bygning af husene, og vindmøllerne bliver medfinansieret. Der er herefter problemer med finansiering af bilerne, og projektet er derfor indtil nu uden brintdrevne biler. Der skal til projektet i alt bruges en finansiering på 4.5 mio. DM, hvorfor privat medfinansiering ikke er nok.

11. VURDERING AF BRINTTEKNOLOGIENS FREMTID

Brint har mange fordele som energibærere (ref. 8):

1) Fleksibilitet

Brints store fleksibilitet gør, at den kan erstatte alle fossile brændsler.

2) Miljø

Brint er i sig selv en forureningsfri energibærer.

3) Lagring

Det forhold, at brint kan lagres, gør at produktionen af el kan gøres uafhængig af efterspørgslen, hvorved kraftanlæggene kan udnyttes maksimalt. Brint til dette formål kan specielt lagres i underjordiske porøse strukturer, som naturgas i dag lagres.

4) Transport

Brint kan økonomisk transporteres over store afstande.

Brint bliver ofte betragtet som en fremtidig alternativ energibærer (ref. 16). De mest attraktive forhold ved benyttelsen af brint som energibærer er de miljømæssige hensyn samt brints forenelighed med elektricitet. En typisk model for et fremtidigt energisystem indeholder solceller og teknologier for transport, lagring og anvendelse af brint. Som regel vil brændselsceller til omdannelse af brint til el være en del af modellen. Systemet er således et energisystem baseret på vedvarende energikilder som sol og vand, og det er velegnet til lagring af energien.

Med andre ord er brint et godt lagringsmedium i et system med solenergi baseret på solceller, vind og bølgeenergi, d.v.s. energikilder der er stokastiske og uden noget lagringspotentiale i sig selv.

I det fremtidige energisystem forventes brint også udnyttet som brændsel til transportmidler samt til stationære formål såsom opvarmning etc. (ref. 14). I dag produceres brint fra lavpris olie eller naturgas, og det benyttes stort set kun til kemiske formål såsom syntese af ammoniak, methanol, petrokemikalier, og til hydro-cracking i olieraffinaderier. Brint som brændsel udgør i dag kun mindre end 1% af den årlige brintproduktion, og derfor er det svært på nuværende tidspunkt at forudsige en pris på brint benyttet til stordistribution.

Det kan dog siges, at brint i dag ikke kan konkurrere økonomisk med fossile brændsler, og denne situation fortsætter givetvis indtil alternative primære energikilder bliver billigere end fossile brændsler. Selv da vil der være store tekniske problemer, der skal løses vedrørende produktion, anvendelse og lagring af brint, før brint for alvor kan indgå i energisystemet.

Der bør imidlertid tages hensyn til sociale (miljø-) omkostninger, når brint vurderes som kommende energibærer (ref. 4). Hvis der eksempelvis indføres energi- og miljøafgift på el fra fossile brændsler, kan brint produceret på basis af solceller hurtigt konkurrere som alternativ energibærer.

Solbaseret brintproduktion forventes, selvom prisen nu er høj, at blive konkurrencedygtig med alle andre produktionsmetoder i år 2000 (ref. 7).

Af interessante forhold i den forbindelse kan nævnes, at Mikael Graetzel, Fysisch-Chemisches Institut, Lausanne, Schweiz, har opfundet en ny titandioxid solcelle med en spænding på 0.3 V (ref. 18). Cellen forventes at være en faktor 50 billigere end konventionelle solceller. En anden fordel ved solcellen er den lave cellespænding, der bevirker, at cellen ikke er ligeså følsom som andre solceller, d.v.s. den fungerer, også selvom der er en sky for solen, hvor andre solceller holder op med at fungere. Den schweiziske industri er ved at få patent på solcellen. Titandioxid cellen har endnu kun en virkningsgrad på 6%, men denne forventes forhøjet inden ud-

gangen af 1991. Hvis solcellen som forventet bliver 50 gange billigere end konventionelle solceller, vil brint produceret på basis af titandioxid solceller hurtigt kunne blive konkurrencedygtig som en alternativ energibærer.

Et fremtrædende gennembrud er ikke nødvendigt noget sted i brintsystemet. Men det må fremhæves, at videre udvikling og forbedring er absolut nødvendig, hvis brintsystemet snart skal kunne konkurrere med det nuværende energisystem eller erstatte det.

11.1. Videre forskning og udvikling

Følgende områder er blevet påpeget for videre forskning og udvikling (ref. 11):

PRODUKTION

- a) Forbedring af effektivitet, økonomi og pålidelighed af avancerede elektrolysører (alkalisk, middeltemperaturelektrolyse, fastpolymer elektrolyse).
- b) Demonstration af elektrolyse med højt effektivitetspotentiale (damp og smeltet salt-elektrolyse).
- c) Demonstration og feltforsøg af elektrolysesystemer med uregelmæssige primære energikilder.

TRANSPORT, LAGRING OG DISTRIBUTION

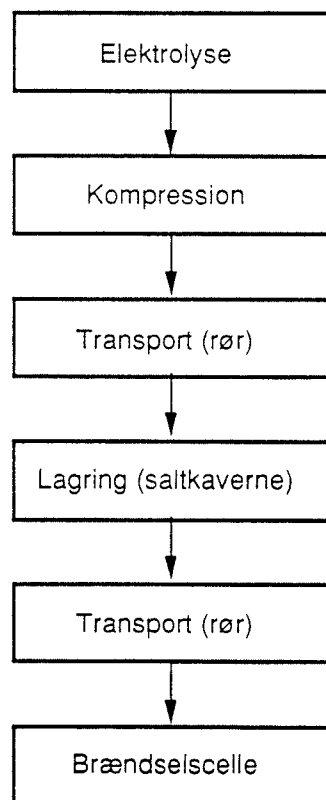
- d) Udvikling af store kompressorer til gasformig brint. Turbomaskiner kan eksempelvis udvikles i stedet for stem-pelmaskiner.
- e) Demonstration af effektive lagre i stor skala.
- f) Demonstration i stor skala af brugbarheden af udstyr og tilbehør (undergrundslagre, rørsystemer, distributionsnetværk).

ANVENDELSE

- g) Teknologier specifikt til brint: feltforsøg og opskalering (dampgenerator, katalytisk brænder), effektivitet, længere levetid, lavere omkostninger (brændselsceller).
- h) Brintanvendelsesområder til transportmidler.
- i) Konventionelle teknologier. Modificering af naturgassystemet til brintanvendelse (flammebrænder, forbrændingsmotor, turbine).
- j) Udvikling af H_2/O_2 -energisystemer til rumfart.
- k) Demonstration af sikkerhed og pålidelighed.

12.KONKLUSION

Nærværende rapport har haft til formål ud fra litteraturstudier og besøg at vurdere mulighederne for at benytte brint som energibærer i forbindelse med ellagring. Specielt har det været formålet at undersøge, hvor stort energitabet er ved at føre 1 kWh gennem et energisystem, der hedder: el-brintfremstilling-brintlagring-el. Effektstørrelsen, der har været behandlet, er 100 MW. Brintlageret er tænkt som sæsonlager (1 cyklus pr. år). Energisystemet, der er blevet betragtet, fremgår af rutediagrammet figur 12.1.



Figur 12.1. Energisystemet med brint som lagringsmedie

12.1. Energieffektivitet

De forskellige el-effektiviteter for hver enkel energiprocess er angivet i tabel 12.1.

Tabel 12.1. El-effektiviteter

	El-virkningsgrader	
	Idag	Fremtiden
Elektrolyse (100 C, 10 bar)	91%	94%
Højtemperaturelektrolyse (1000 C)		137%
Kompression	96%	96%
Rørtransport	100%	100%
Lagring i saltkaverne	99%	99%
Brændselscelle (1000 C)	60%	65%

Tabellen angiver de rene el-effektiviteter for processerne i dag samt de forventelige effektiviteter i fremtiden. Ved såvel elektrolyseprocessen som ved omdannelsen af elektricitet i brændselscellen vil der fremkomme en mængde varme ved omkring 100°C, der kan benyttes til fjernvarme. (Brændselscelleprocessen indgår i første omgang ved en temperatur på 1000°C, men denne varme kan benyttes i en gasturbine til at have el-effektiviteten. Den resterende mængde spildvarme fremkommer herefter ved ca. 100°C.)

Ved benyttelse af effektiviteterne angivet i tabel 12.1 kan drages følgende konklusioner:

Konklusion 1 (Status)

El-effektiviteten ved at føre en mængde el gennem systemet: elektrolyse-kompression-lagring-brændselscelle er i dag 53%.

Af det resterende tab kan en mængde på 40% benyttes til fjernvarme.

Total effektivitet herefter: 93%.

Konklusion 2 (Fremtiden)

Effektiviteterne ved flere af processerne forventes at stige i fremtiden. Ved således at føre en mængde el gennem samme energisystem i fremtiden vil der kunne opnås en el-effektivitet på 59%. Ud over dette kan 35% benyttes til fjernvarme.

Total effektivitet: 94%.

Hvis elektrolyseanlægget og brændselscelleenheden er placeret i nærheden af et fjernvarmesystem, er tabet ved benyttelsen af brint som energibærer således minimalt. Der findes i dag næppe lagringssystemer med bedre effektivitet. Dette kræver dog, at overskudsvarmen kan udnyttes, hvilket først kan afgøres i forbindelse med en systemindpasning.

Ovennævnte effektiviteter er opnået ved brug af konventionel elektrolyse, salthorste, samt fastoxid brændselsceller som hovedkomponenter. Ved brug af andre komponenter kan der givetvis opnås større el-effektiviteter. Eksempelvis kan højtemperatur elektrolysen have el-effektiviteten til 86%. Dette kræver imidlertid tilstedeværelsen af en mængde overskudsvarme ved høj temperatur.

12.2. Økonomiske forhold

Aktuelle økonomiske data for hele systemet elektrolyse-kompression-lagring-brændselscelle har ikke været tilgængelige. Specielt er det svært at prissætte brændselscellen, hvilket hænger sammen med, at brændselscellen er en forholdsvis ny teknologi under udvikling, og der er derfor ingen masseproduktion igang. Der er dog i flere litteraturkilder angivet forventninger til fremtidens økonomi. De fremtidige forventelige økonomiske data for de enkelte processer er som følgende:

Elektrolyse	0,13 kr./kWh input
Lagring (inkl. kompression)	0,07 kr./kWh input
Brændselscelle	0,28 kr./kWh input

1 kWh tilføres elektrolyseprocessen, hvorved 0,94 kWh kommer ud, lagres og sidenhen konverteres til el i brændselscellen.

Set ud fra et økonomisk synspunkt kan herefter drages følgende konklusion:

Konklusion 3

Det forventes om 10-15 år at koste 45 øre for hver kWh el, der tilføres systemet (omdannelse til brint, lagring som brint og siden hen omdannelse til elektricitet).

Ved beregning af øre/kWh output skal der tages hensyn til energi-effektiviteten. For således at få 1 kWh el ud af systemet skal systemet tilføres 1,7 kWh ($1/0,59$), hvilket koster 76 øre. I ovennævnte pris indgår elprisen ikke, men er sat til nul. Er elprisen 10 øre/kWh på det tidspunkt, elektriciteten skal lagres, skal de 10 øre lægges til de 45 øre, hvorefter den samme kWh koster 94 øre, efter at den har været omdannet til brint, lagret og omdannet til el igen.

Det skal her tages i betragtning, at elektriciteten vil blive lagret på tidpunkter med lavlast eller billig importeret el til rådighed, mens brint sandsynligvis vil blive genvundet fra lageret og omdannet til elektricitet igen under spidslastsituationer.

Ovennævnte betragtninger gælder som tidligere nævnt en situation, hvor lageret fungerer som sæsonlager. Kan det samme lager samtidig fungere som døgnlager eller ugelager, bliver omkostningerne naturligvis mindre.

13. VIDERE PROJEKTFORLØB

Nærværende rapport er som tidligere nævnt en afslutning på den første del af projektet "brint som energibærer". Rapporten har specielt koncentreret sig om teknologier vedrørende lagring af brint i stor skala i forbindelse med ellagring. De gennemgåede procesforløb har derfor været tilknyttet teknologier baseret på el. Således er elektrolysen blevet behandlet som eneste fremstillingsmetode af brint, og anvendelsen af brinten igen peger kun på brændselsceller. Der findes imidlertid mange andre former for såvel fremstillingsmetoder som anvendelsesformål.

I et videre projektforsøg vil andre fremstillingsmetoder således blive analyseret, alt efter hvorledes brint skal indgå i energisystemet. Fremstillingsmetoden er afhængig af valg af primær energikilde. Ligeledes vil mulige anvendelsesmetoder for brint blive analyseret, idet brint kan indgå i energisystemet som såvel elkilde, varmekilde samt som brændsel til transportformål.

Figur 13.1. viser en sammenligning af et energisystem på basis af fossile brændsler og et brintenergisystem (ref. 12).

En total energimængde på 1000 enheder er fordelt på de 4 energisektorer 1) Transport, 2) Industri, 3) Proces og 4) Husholdning. Indenfor hver energisektor er angivet, hvorledes energienhederne benyttes. Herefter er det indenfor hvert anvendelsesområde opgjort, hvor mange brintenheder der skal bruges for at opfylde samme energibehov som energibehovet baseret på fossile brændsler, og den totale mængde brintenheder, der kan modsvare forbruget baseret på fossile brændsler, er endeligt opgjort. Tabellen viser totalt en energireduktion på 25% ved benyttelsen af brint i stedet for fossile brændsler. Det må bemærkes, at tallene i tabellen er baseret på en omstilling til et totalt brintsamfund.

Energy sector	Fossil energy consumption by sector (Arbitrary units)	End-use energy form/sub-sector	Fossil energy consumption by end-use (Arbitrary units)	H ₂ efficiency advantage $100(\eta_s - \eta_f)/\eta_f$ (Percentage)	Reference	H ₂ energy consumption by end-use (Arbitrary units)	H ₂ energy consumption by sector (Arbitrary units)
Transport	250	Road (IC engine)	120	22	[81]	99	186
		Road (fuel cell)	25	133	[60]	11	
		Rail (fuel cell)	15	84	[60]	8	
		Sea (IC engine)	25	22	[81]	21	
		Sea (fuel cell)	15	84	[60]	8	
		Air (subsonic)	25	19	[76]	21	
		Air (supersonic)	25	38	[77]	18	
Industrial	300	Heat	250	24	[83]	145	210
		Electricity (fuel cells)	50	84	[60]	65	
Commercial	150	Heat	110	24	[83]	89	111
		Electricity (fuel cells)	40	84	[60]	22	
Residential	300	Heat	250	24	[83]	202	229
		Electricity (fuel cells)	50	84	[60]	27	
World totals:	1000						736

Figur 13.1. Sammenligning i effektivitet mellem fossile brændsler og brint (ref. 12)

Det vil i det videre projektforløb blive søgt at opstille en lignende tabel under danske forudsætninger. Det vil således blive vurderet inden for hvilke sektorer brint realistisk kan udnyttes i det danske energisystem, og hvorledes brinten hensigtsmæssigt kan benyttes vil blive belyst. Der vil herved fremkomme en opgørelse over, hvor stor en del af det fremtidige energibehov i Danmark, der kan dækkes af brint.

De forskellige anvendelsesmuligheder for brint vil blive indarbejdet i BRUS-modellen (energimodel udviklet til benyttelse i energihandlingsplanen "Energi 2000"), hvorved der kan opstilles forskellige scenarier, der kan dokumentere såvel de energimæssige, miljømæssige som økonomiske konsekvenser ved benyttelsen af brint som energibærer.

Figur 13.2 viser et eksempel på resultatet af en scenarie-kørsel.

Energisektor	Anvendelse	----- ENERGIFORBRUG -----		----- EMISSIONER -----		----- ØKONOMI -----	
		Fossile brændsler	Brint	Fossile brændsler	Brint	Fossile brændsler	Brint
Husholdning	Varme						
	Elektricitet						
	Total						
Transport	Biler						
	Jernbane						
	Skibe						
	Fly						
	Total						
	.						
	.						
	.						
	Total						

Figur 13.2. Scenariemodell

REFERENCER

1. SELVAM, P. (1991). Energy and environment - an all time search. Geneva, Switzerland. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 1, pp. 35-45.
2. GOLTSOVA, L.F., GARKUSHEVA, V.A., ALIMOVA, R.F, GOLTSOV, V.A. (1990). Scientometric studies of the problem of "hydrogen energy and technology" in the world. Donetsk, USSR. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 9, pp. 655-661.
3. SCOTT, D.S, HÄFELE, W. (1990). The coming hydrogen age: Preventing world climatic disruption. Victoria, Canada; Jülich, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 10, pp. 727-737.
4. WINTHER, C.J., KLAISS, H., NITSCH, J. (1989). Hydrogen as an energy carrier: What is known? What do we need to learn? Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 2, pp. 79-91.
5. KNOCH, P.H. (1989). Energy without pollution: Solar-wind-hydrogen systems: Some consequences on urban and regional structure and planning. München, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 12, pp. 903-906.
6. WINTHER, C.J., NITSCH, J. (1989). Hydrogen energy - a "sustainable development" towards a world energy supply system for future decades. Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 11, pp. 785-796.
7. DINGA, Gustav P. (1989). Hydrogen: The ultimate fuel and energy carrier. Moorhead, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 11 pp. 777-784.

8. MARCHETTI, C. (1988). Central-place theory and the key to hydrogen dominance. Laxenburg, Austria. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 12, pp. 725-728.
9. VAZ DE CAMPOS, E.F.P. (1987). The integration of hydrogen technologies with the energy utilities. Sao Paulo, Brasil. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 12. pp. 847-853.
10. LODHI, M.A.K. (1987). Hydrogen city. Lubbock, Texas, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 11, pp. 783-803.
11. WINTHER, C.J. (1987). Hydrogen energy - expected engineering break-throughs. Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 8, pp. 521-546.
12. NEJAT VEZIROGLU, T. (1986). Hydrogen technology for energy needs of human settlements. Coral Gables, Miami, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 2, pp. 99-129.
13. Møde hos DONG, Carsten Mørup. Hørsholm, Danmark. 19 april 1991.
14. JENSENS, J. (1980). Energy Storage. Newnes-Butterworths.
15. IEA Hydrogen Executive Committee (1989). Program of research and development on the production of hydrogen from water.
16. FINNSTRØM, Bengt (1989). Hydrogen - a study of efficiencies. Swedish National Board for Technical Development, Sweden. Paper vedlagt IEA Annual Report.
17. HAUSSINGER, P., LOHMULLER, R., WATSON, A.M. (1991). Ullmanns værker. Hydrogen. Tyskland. Vol. A 13, pp. 297-442.
18. Videofilm "EUROPAMONDUL 2000" (1991).

19. EKLAND, G., KRUSENSTIERNA, O. von (1982). Storage and transportation of merchant hydrogen. Lidingø, Sweden. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 8, No. 6, pp. 463-470.
20. NEJAT VEZIROGLU, T. (1986). Hydrogen technology for energy needs of human settlements. Miami, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 2, pp. 99-129.
21. KASKE, G., PLENARD, F.J. (1985). High-purity hydrogen distribution network for industrial use in Western Europe. Chemische Werke Hyls, Marl, F.R.G.; L'Air Liquide, Paris, France. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 10, No. 7, pp. 479-482.
22. OHTA T., FUNK, J.E., PORTER, J.D., TILAK, B.V. (1985). Hydrogen production from water: Summary of recent research and development presented at the fifth WHEC. Yokohama, Japan; Kentucky, New Jersey, New York, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 10, No. 9, pp. 571-576.
23. CAMERON, D.S. (1990). World developments of fuel cells. Reading, England. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 9, pp. 669-675.
24. SZYSZKA, A. (1990). Technical communication. Realization of the solar-hydrogen project at Neunburg vorm Wald, F.R.G. München, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 8, pp. 597-599.
25. ENERGISTYRELSEN (1990). Energinyt. København, Danmark. 1990, Nr. 2.
26. KORDESCH, K. and others, TOMANTSCHGER, K. (1989). Fuel cell research and development projects in Austria. Graz, Austria; Ontario, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 12, pp. 915-925.
27. TARNEY, D.S. (1985). Hydrogen production at hydro-power plants. Federal Energy Regulatory Commission. Washington,

- USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 10, No. 9, pp. 577-584.
28. STERNFELD, H.J., HEINRICH, P. (1989). A demonstration plant for the hydrogen/oxygen spinning reserve. Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 10, pp. 703-716.
 29. CRAWFORD, G.A, HUFNAGL, A.F. (1987). Electrolyser Inc. advanced hydrogen plant at Becancour, Quebec. Ontario, Canada. Int. J. Hydrogen Energy Vol. 12, No. 5, pp. 297-303.
 30. NAJJAR, Y.S.H. (1991). A cryogenic gas turbine engine using hydrogen for waste heat recovery and regasification og LNG. Jeddah, Saudi Arabia. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 2, pp. 129-134.
 31. KASKE, G., SCHMIDT, P., KANNGIESSER, K.W. (1991). Comparison between high-voltage direct-current transmission and hydrogen transport. Marl, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 2, pp. 105-114.
 32. CARDEN, P.O., PATERSON, L. (1979). Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage. Canberra, Australia. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 4, pp. 559-569.
 33. VEZIROGLU, T.N., GÜRKAN, I., PADKI, M.M. (1989). Remediation of greenhouse problem through replacement of fossil fuels by hydrogen. Coral Gables, Miami, USA; Eskisehir, Turkey. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 4, pp. 257-266.
 34. NEMETH, N. (1990). Environment and energy: Problems, resolutions, solutions. Ottawa, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 7, pp. 457-462.
 35. TAYLOR, J.B. (1984). Hydrogen energy prospects in Canada. Ottawa, Ontario, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 9,

No. 1/2, pp. 1-7.

36. PERALDO BICELLI, L. (1986). Hydrogen: A clean energy source. Milan, Italy. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 9, pp. 555-562.
37. DAHIYA, R.P. (1986). Transition to hydrogen energy, Delhi, India. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 6, pp. 419-421.
38. GUTH, M.A.S. (1986). Solar Hydrogen small user market potential. Knoxville, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 4, pp. 247-265.
39. NITSCH, J.E. (1986). Large-scale solar energy utilization-possibilities and restrictions. Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 1, pp. 23-32.
40. HAMMERLI, M. (1984), When will electrolytic hydrogen become competitive? Ottawa, Ontario, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 1/2, pp. 25-51.
41. HYDROGEN INDUSTRY COUNCIL OF CANADA (1984). New Industrial opportunities with hydrogen technologies. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 1/2, pp. 9-23.
42. GROB, Gustav R. (1990). Renewable, Clean Energies: Urgency-Solutions-Priorities. Zürich, Switzerland. 1st World Renewable Energy Congress, September 1990.
43. NEJAT VEZIROGLU, T. (1983). The unifier of non-conventional energy sources: Hydrogen energy system. Coral Gables, Miami, USA. In: A 1983 view of non-conventional energy sources. Miramare, Trieste, Italy. June 1983. (Eds.: Furlan, G., Mancini, N.A., Sayigh, A.A.M.)
44. NEJAT VEZIROGLU, T. (1989). Comparison of solar-hydrogen with synthetic fossil fuels. Coral Gables, Miami, USA. Energy Storage Systems pp. 431-447. (Eds.: Killaç B.,

Kakaç S.)

45. ELJRUSHI, G.S., VEZIROGLU, T.N. (1990). Solar-Hydrogen energy system for Libya. Tripoli, Libya; Coral Gable, Miami, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 12, pp. 885-894.
46. GRETZ, J., BASELT, J.P., ULLMANN, O., WENDT, H. (1990). The 100 MW Euro-Quebec hydro-hydrogen pilot project. Varese, Italy; Frankfurt, F.R.G., Ottobrunn, Germany; Darmstadt, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 6, pp. 419-424.
47. BROWNE, S.H, NEILL, D.R., TAKAHASHI, P.K. (1988). The Hawaii hydrogen from renewable energy program. Honolulu, Hawaii, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 8, pp. 483-488.
48. QUADFLIEG, H. (1988). From research to market application? Experience with the German hydrogen fuel project. Cologne, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 6, pp. 363-374.
49. NITSCH, J., WINTHER, C.J. (1987). Solar hydrogen energy in the F.R. of Germany: 12 theses. Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 10, pp. 663-667.
50. FLOWERS, A., KRIST, K. (1987). Overview of gas research institute R&D program. Chicago, Illinois, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 10, pp. 669-674.
51. ALDER, H.P. (ed.) (1987). Report of the Swiss Group: Hydrogen in air transportation, feasibility study for Zürich Airport, Switzerland. Würenlingen, Switzerland. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 8, pp. 571-585.
52. DUTTA, S. (1990). Technology assessment of advanced electrolytic hydrogen production. Cape Canaveral, Florida, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 6, pp. 379-

386.

53. DUTTA, S., BLOCK, D.L., PORT, R.L. (1990). Economic assessment of advanced electrolytic hydrogen production. Cape Canaveral, Florida, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 6, pp. 387-395.
54. MILLET, P., DURAND, R., PINERI, M. (1990). Preparation of new solid polymer electrolyte composites for water electrolysis. Grenoble, St. Martin d'Hères, France. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 4, pp. 245-253.
55. YOSHIDA, K., KAMEYAMA, H., AOCHI, T., NOBUE, M., AIHARA, M., AMIR, R., KONDO, H., SATO, T., TADOKORO, Y., YAMAGUCHI, T. SAKAI, N. (1990). A simulation study of the UT-3 thermochemical hydrogen production process. Tokyo, Japan. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 3, pp. 171-178.
56. OGDEN, J.M., WILLIAMS, R.H. (1990). Electrolytic hydrogen from thin-film solar cells. Princeton, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 3, pp. 155-169.
57. KOVACIK, G. OGUZTÖRELI, M., CHAMBERS, A., ÖZÜM, B. (1990). Equilibrium calculations in coal gasification. Alberta, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 2, pp. 125-131.
58. BAYKARA, S.Z., BILGEN, E. (1989). An overall assessment of hydrogen production by solar water thermolysis. Gebze, Kocaeli, Turkey; Montreal, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 12, pp. 881-891.
59. RABAH, M.A., ELDIGHIDY, S.M. (1989). Low cost hydrogen production from waste. Cairo, Zagazig, Egypt. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 4, pp. 221-227.
60. SIEGEL, A., SCHOTT, T. (1988). Optimization of photovoltaic hydrogen production. Stuttgart, F.R.G. Int. J.

Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 11, pp. 659-675.

61. BOCKRIS, J.O'M, KAINTHLA, R.C. (1988). The conversion of light and water to hydrogen and electric power. Texas, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 6, pp. 375-383.
62. OHTA, T. (1988). Photochemical and photoelectrochemical hydrogen production from water. Yokohama, Japan. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 6, pp. 333-339.
63. DÖNTZIG, W., DIETRICH, G., ERDLE, E, STREICHER, R. (1988). Electrochemical high temperature technology for hydrogen production or direct electricity generation. Frankfurt, West Germany. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 5, pp. 283-287.
64. DaSILVA, D.B., BITU, R.S. (1988). Electrolytic hydrogen production in Brazilian electric utilities - a way to increase return on investments. Sao Paulo, Brasil. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 2, pp. 77-79.
65. BALTAZAR, V., PRION, D.L., GUL, T. (1988). Electrolysers for hydrogen production - an international marketing study. Montreal, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 13, No. 2, pp. 61-66.
66. LODHI, M.A.K. (1987). Hydrogen production from renewable sources of energy. Texas, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 7, pp. 461-468.
67. CYPRES, R. (1987). Modern carbochemical processes for hydrogen production from coal. Brussels, Belgium. Int. J. Hydrogen energy, Vol. 12, No. 7, pp. 451-460.
68. JIN SHAN, Wang, PENG SHENG, Mao, FU SHAN, Tang (1987). Hydrogen production in China and its prospects. Zibo, Shandong, China. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 5, pp. 315-321.

69. ENGELS, H., FUNK, J.E., HESSELMANN, K., KNOCHE, K.F. (1987). Thermochemical Hydrogen Production. Aachen, West-Germany; Lexington, Kentucky USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 5, pp. 291-295.
70. TENNAKONE, K. (1987). Two-step photochemical reaction for hydrogen production. Matara, Sri Lanka. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 2, pp. 79-80.
71. AHN, Y.K., FISCHER, Wm.H. (1986). Production of hydrogen from coal and petroleum coke: Technical and economic perspectives. Reading, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 12, pp. 783-788.
72. SHIEH, C.L. (ed.) (1986). Bibliography of Chinese works on hydrogen energy and related subjects. Shenzhen, China. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 12, pp. 821-824.
73. DOCEKAL, J. (1986). Hydrogen production from hydrocarbons. Brno, Czechoslovakia. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 11, pp. 709-714.
74. AHMED, S.M. (1986). The Canadian contribution to the I.E.A. work on photoelectrolysis of water. Ottawa, Ontario, Canada.
75. KHARKATS, Yu.I., GERMAN, E.D., KAZARINOV, V.E., PSHENICHNIKOV, A.G., PLESKOV, Yu.V. (1986). Hydrogen production by solar energy: Optimization of the plant "solar array + electrolyzer". Moscow, USSR. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 10, pp. 617-621.
76. FISCHER, M. (1986). Review of hydrogen production with photovoltaic electrolysis systems. Stuttgart, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 8, pp. 495-501.
77. LEDJEFF, K. (1990). Comparison of storage options for photovoltaic systems. Freiburg, F.R.G. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 9, pp. 629-633.

78. KREPEC, T., MIELE, D., LISIO, C. (1990). Improved concept of hydrogen on-board storage and supply for automotive applications. Montreal, Quebec, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 1, pp. 27-32.
79. LEWIS, F.A. (1987). Structural alterations of metals in the generation, distribution and storage of hydrogen. Belfast, Northern Ireland. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 8, pp. 643-655.
80. SUDA, S. (1987). Metal Hydrides. Tokyo, Japan. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 12, No. 5, pp. 323-331.
81. ZAIDMAN, B., WIENER, H., SASSON, Y. (1986). Formate salts as chemical carriers in hydrogen storage and transportation. Jerusalem, Israel. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 5, pp. 341-347.
82. TAYLOR, J.B., ALDERSON, J.E.A., KALYANAM, K.M., LYLE, A.B., PHILLIPS, L.A. (1986). Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen. Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 1, pp. 5-22.
83. PODGORNY, A.N., MISCHENKO, A.I., SOLOVEY, V.V. (1984). Techno-economic aspects of hydrogen storage in an automobile. Kharkov, USSR. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 9, pp. 773-781.
84. WALLACE, J.S. (1984). A comparison of compressed hydrogen and CNG storage. Toronto, Canada. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 7, pp. 609-611.
85. MARTIN, K.P. (1985). Underground storage in salt cavities. Hydrogen Industry Council's Information Bulletin, Vol. 2, No. 4.
86. STEINBERG, Meyer, CHENG, Hsing C. (1989). Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil

- fuels. Upton, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 11, pp. 797-820.
87. KASKE, G., SCHMIDT, P., KANNGIESSER, K.W. (1991). Comparison between high-voltage direct-current transmission and hydrogen transport. Marl, Tyskland. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 2, pp. 105-114.
 88. DREYER, W. (1982). Underground Storage of Oil and Gas in Salt Deposits and Other Non-Hard Rocks. Stuttgart, Tyskland. Geology of Petroleum, Vol. 4.
 89. WINTHER, C.-J., NITSCH, J. (1986). Wasserstoff als Energieträger.
 90. HYDROGEN ENERGY. A symposium arranged by the Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, May 21 (1981). IVA-rapport 199. Ingenjörsvetenskapsakademien, Stockholm, Sverige.
 91. SCHLEISNER, L., NIELSEN, L.H. (1991). Brint som energibærer. Statusnotat. Energisystemgruppen, Forskningscenter Risø, Roskilde, Danmark.
 92. BRAUN, J., LINDSTRØM, O., LUNDGREN, L., SIGURD, D., STOLT, L. (1988). Elframställning för framtiden. Energiforskningsnämnden, Efn-rapport nr. 26. Sverige.
 93. SCHLEISNER, L. (1990). El- og varmeproduktionsteknologier. Risø-M-2877. Forskningscenter Risø, Roskilde, Danmark.
 94. ENERGISYSTEMGRUPPEN (1984). Den teknologiske udvikling og dennes betydning for udformningen af det fremtidige energisystem. Udredningsopgave for Energiministeriet. Forskningscenter Risø, Roskilde, Danmark.
 95. RIDER, D.K. (1981). Energy: Hydrocarbon fuels and chemical resources. Bell Laboratories, Murray Hill, USA.

96. GLYNN, P. (1986). Prospects for hydrogen from advanced water electrolysis. Based on results emanating from the EEC R&D subprogramme on hydrogen (1975-83). EUR-10290. Dublin, Irland.
97. HYDROGEN: Its Technology and Implications (1979). Vol. I-V. CRC Press, Florida, USA.
98. GIACOMAZZI, G. (1988). Hydrogen supply over long distances using chemicals. Description, evaluation and comparison of benzene and toluene based technical systems. EUR-11330. Ispra, Italien.
99. LINDBLOM, U.E., GOODALL, D.C., BREKKE, T.L. (1985). Underground bulk storage of hydrogen in mined caverns. Energiforskningsnämnden, Långsiktig energiteknikforskning (LET). Projektresultat EFN/LET 1984:24. Berkeley, Californien.
100. KELLEY, J.H., HAGLER, R. (1979). Storage, transmission and distribution of hydrogen. Pasadena, USA. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 5, pp. 35-54.
101. ØSTERBERG, C.-J. (1987). Vätgas en fremtida energibärare. Energiforskningsnämnden, Efn-rapport nr. 25. Sverige.
102. FOH, S., NOVIL, M., RANDOLPH, P. (1979). Underground hydrogen storage. Brookhaven National Lab., Upton, USA.
103. NEALE, M., MARTIN, K.P. (1991) ICI Runcorn og ICI Wilton, England. Personlig kommunikation.
104. WONIGHEIT (1991). Stadtwerke Kiel, Kile, Tyskland. Personlig kommunikation.
105. STYRIKOVICH, M.A., MALYSHENKO, S.P. (1986). Bulk Storage and Transmission of Hydrogen in Hydrogen Energy Progress VI. Proc. 6th World Hydrogen Energy Conf., Vienna 1986. pp. 765-786.

106. FUEKI, K. Professor Emeritus, the University of Tokyo, Chairman, WEC fuel cell study committee (1988). Fuel cell-past trends and future prospects.

Brint som energibærer — Litteratursøgning, kontaktformidling

Joh Kjeller, Afd. for Materialforskning

Artiklerne vil blive inddelt i grupper, som passer ind i statusnotatet fra Lotte Schleisner og Lars Henrik Nielsen, Energisystemgruppen:

- 1) Introduktion af H₂ som energibærer.
- 2) Fremstilling
- 3) Transport
- 4) Lagring
- 5) Anvendelse
- 6) Diverse

Et mål vil være at samle ca. 50 artikler og derefter se, hvor der er mangler, f.eks. hvad der skal udbygges i forhold til det projekt, der evt. skal køre her i Danmark.

Besøg på institutter/virksomheder vil være af stor interesse, når de første informationer er bearbejdet.

Der er kun få artikler om metalhydrider, da vi endnu ikke har lagt os fast på anvendelsesområdet. Mange af disse artikler vil derfor være af grundforskningsmæssig karakter, men til dette projekt kan de teknologiske pilles fra, som f.eks.

Hydrider til transport
 lagring
 varmepumper

Andre tidsskrifter vil blive gennemgået: Wind, gas m.fl.

Konferencer med hydrogen som emne (bøger), specielt den teknologiske del.

Referencer fra de udvalgte artikler i Hydrogen Energy vil blive fremskaffet.

Hydrogen Energy vol. 14 (1989) mangler 1-2-6
~~vol. 15 (1990) mangler 7 → 12~~

År 1989			
International Journal Hydrogen Energy			
Nr.	Titel	Forfattere — Land	Vigtige referencer
Vol 14 No. 4 221-227	(H ₂ produktion) spild- materiale indehol- dende cellulose	S.M. Eldighidy M.A. Rabak Cairo-Egypten	
Vol. 14 No. 4 257-266	Fossilt brændsel er- stattet af hydrogen for reduktion af CO ₂	T.N. Veziroglu I. Gürkan M.M. Padhi Universitetet Maine USA	
Vol. 14 No. 7 421-429	(H ₂ produktion) UT- 3 Termo-kemisk pro- duktionsanlæg	K. Yoshida T. Tadokoro H. Kameyama m.fl. Tokyo-Japan	
Vol. 14 No. 7 437-447	Lagring af H ₂ i aktivt kul (AX-3IM)	K.A.G. Amankwak J.S. Noh J.A. Schwarz Syracuse Universitet USA	
Vol. 14 No. 7 449-474	H ₂ som brændsel til biler	T. Petkov J.W. Sheffield T.N. Veziroglu	sammendrag
Vol. 14 No. 8 493-506	Spaltning af naturgas H ₂ -CO ₂ -CO ₂ lagres forbedring af miljø	C. Marchatti (syste- manalyse) Laxen- burg, Østrig	
Vol. 14 No. 8 507-513	Indiens H ₂ program	M.V.C. Sastri Madras Universitet	
Vol. 14 No. 8 551-561	H ₂ produktion fra re- aktorer (nukleare)	S. Yalçin Miami Universitet, USA	
Vol. 14 No. 8 579-586	Sæsonlagring af H ₂ MTH system brugt til køretøjer	N.F. Grünenfelder Th.H. Schucan Paul Scherrer Institut Schweiz	
Vol. 14 No. 8 599-602	H ₂ teknologi i Rus- land Kørsel m.m.	A.N. Podgorny Kharkov-USSR	
Vol. 14 No. 8 603-616	Transport af LH ₂ skibsfart (CEC pro- jekt)	G. Giacomazzi Ispra-Italien	

År 1989			
International Journal Hydrogen Energy			
Nr.	Titel	Forfattere — Land	Vigtige referencer
Vol. 14 No. 10 703-716	H ₂ /O ₂ damp generator strømproduktion	H.J. Stempf P. Heinrich Aerospace-Tyskland	
Vol. 14 No. 10 727-735	Udvikling af H ₂ teknologi i Tyskland Metalhydrid + rensning af H ₂	O. Bernauer Mülheim-Tyskland	
Vol. 14 No. 10 737-748	Forbrænding af H ₂ +luft (vægtfyldeforskelle)	H.P. Tritt K.M. Isaac Y.S. Chen NASA-USA	
Vol. 14 No. 11 777-784	H ₂ som brændsel og energibærer (hvilke lander arbejder med projekter)	Gustav P. Dinga Corcordia College-USA	Mange ref. på arbejde udført i tekn.sammenhæng.
Vol. 14 No. 11 785-796	H ₂ -udvikling af energisystem til fremtiden	C.J. Winter J. Nitsch Stuttgart-Tyskland	
Vol. 14 No. 11 797-820	H ₂ produktion fra fossil brændsel 5 produktionsmetoder	Meyer Steinberg Hsing C. Cheng Brookhaven-USA	
Vol. 14 No. 12 903-906	Ren energi: sol-wind H ₂ systemer	P.H. Knock Institut Byplan München-Tyskland	8. O. Tegström, Sverige
Vol. 14 No. 12 907-913	(H ₂ transport) + motor	S. Furuham Musashi Institute Tokyo-Japan	
Vol. 14 No. 12 915-925	Brændselscelleforskning	K. Tomantschger + andre Graz-Østrig	

År 1990			
International Journal Hydrogen Energy			
Nr.	Titel	Forfattere — Land	Vigtige referencer
Vol. 15 No 1 27-32	Brint til brug for auto- mobiler (flydende H ₂)	T. Krepec D. Miele C. Lisio Quebec-Canada	1-2
Vol. 15 No. 2 125-131	(Produktion af H ₂) Gasifisering af kul	G. Kovacic A. Chambers m.fl. Alberta Research-Ca- nada	
Vol. 15 No. 3 155-169	(Produktion af H ₂) solceller	J.M. Ogden R.H. Williams Energi-miljøafd. Princeton Universitet-USA	32
Vol. 15 No. 3 171-178	(Produktion af H ₂) UT-3-termokemisk reaktion for H ₂ pro- duktion	K. Yoshida H. Kameyama m.fl. Universitet Tokyo- Japan	
Vol. 15 No. 4 245-253	(Produktion af H ₂) Elektrolyse (SPE) Solid Polymer Elec- trolyse År 2000 Projekt	P. Millet R. Durand M. Pineri Grenoble-France	
Vol. 15 No. 5 357-367	(Transportfly) flydende H ₂ til frem- tidens fly — drivhuseffekt	D.G. Victor International institut for systemanalyse Laxenburg-Østrig	Noter og referencer 49 stk.
Vol. 15 No. 6 379-386	(Produktion af H ₂) Avanceret elektrolyse	S. Dutta Cape Canaveral-USA	
Vol. 15 No. 6 387-395	Avanceret elektrolyse Økonomivurdering	S. Dutta D.L. Block R.L. Port Cape Canaveral-USA	
Vol. 15 No. 6 419-424	100 MW Pilot Projekt H ₂ produktion fra vandkraft	J. Gretz J.P. Baselt O. Ullmann H. Wendts m.fl. Ispra-Italien	
Vol. 15 No. 6 425-443	H ₂ i forbrændingsmo- torer. Gennemførte forsøg + fremtiden	L.M. Das New Delhi-Indien	Mange ref. fra ar- bejde, der er udført inden for området.

År 1990			
International Journal Hydrogen Energy			
Nr.	Titel	Forfattere — Land	Vigtige referencer
Vol. 15 no. 2 Side 79-91, 1990	Brint som energi- bærer. Hvad ved man — Hvad er nødven- digt at lære	C.Z. Winter H. Klaiss J. Nitsch	11-7 Verdenskonf. Moscow 25-29 sep. 88
Vol. 15 No. 7 457-462	Miljø-energi Problemer-løsninger	N. Németh Afd. for Energi Ottawa-Canada	Bruntland
Vol. 15 No. 7 507-514	H ₂ til brug for diesel- motorer	J.K.S. Wong Ottawa-Canada	
Vol. 15 No. 8 579-595	H ₂ som brændstof til fly	G.J. Winter (DLR) Fly og Rumfart Stuttgart-Tyskland	
Vol. 15 No. 8 597-599	H ₂ produktion ved so- lenergi (Neunberg)	A. Szyszka München-Tyskland	
Vol. 15 No. 9 655-661	Hvad er der skrevet om H ₂ -energi og te- knologi (i årene 1977- 87)	L.F. Goltsova U.A. Garkusneva R.F. Almova U.A. Goltsov USSR	Litteraturstudie
Vol. 15 No. 9 663-668	Økonomimodeller for H ₂ som brændsel og transport	H.J. Plass Jr.F. Barbir H.P. Miller Universitet Miami-USA	
Vol. No. 9 669-675	Udviklingen af brændselsceller på verdensplan	D.S. Cameron Reading-England	
Vol. No. 10 727-737	Den kommende "H ₂ alder" beskytter kli- maet (CO ₂)	D.S. Scott Universitet Victoria- Canada W. Häfele Jülich-Tyskland	
Vo. 15 No. 10 757-762	Hybrid bil H ₂ /benzin	W. Seifritz Paul Scherrer-Institut Villingen-Schweiz	Bruge MgH ₂ (Risø Arbejde)
Vol. 15 No. 11 817-825	LH ₂ pumper til for- skellig anvendelse	W. Peschka Stuttgart-Tyskland	

Title and author(s) HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER (focusing on electricity storage) Progress report (in Danish) Lotte Schleisner, Lars Henrik Nielsen, Allan Schrøder Pedersen, John Kjøller					Date June 1991		
					Department or group System Analysis Department Energy Systems Group		
					Groups own registration number(s) ESG 02673.00-21		
					Project/contract no. ENS - 151/90-0030		
Pages 127	Tables 12	Illustrations 12	References 106	ISBN 87-550-1746-0			
Abstract (Max. 2000 char.) This report is a progress report on the project "hydrogen as an energy carrier". The report deals especially with utilization of hydrogen as a storage medium for electricity. Especially techniques concerning production, storage, transportation and utilization of hydrogen have been described. The description of the various technologies deals primarily with technologies already demonstrated. The report is based on literature studies and in some cases personal information or meetings.							
Descriptors - EDB/INIS DENMARK; ELECTRIC POWER; ENERGY STORAGE; FEASIBILITY STUDIES; HYDROGEN; HYDROGEN STORAGE; HYDROGEN-BASED ECONOMY; TECHNOLOGY ASSESSMENT; USES							
Available on request from Risø Library, Risø National Laboratory, (Risø Bibliotek, Forskningscenter Risø), P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark. Telephone 42 37 12 12, ext. 2268/2269. Telex: 43116, Telefax: 46 75 56 27							

RISØ

Forskningscenter Risø hører under Energiministeriet og har godt 900 ansatte, hvoraf ca. en tredjedel er forskere. Risø udfører strategisk forskning og udvikling i et udstrakt internationalt samarbejde. Forskningen skal bidrage til grundlaget for den teknologiske udvikling i samfundet inden for områderne energi, miljø og materialer.

Inden for energiområdet arbejdes der med fremtidens energisystemer. Indsatsen er rettet mod forskning og udvikling inden for: Forbrændingsteknologi, brændselsceller, vindmøllekonstruktioner og energiplanlægning.

På miljøområdet skal forskningen skabe grundlag for at udvikle nye, miljøvenlige teknologier til industri og landbrug. Indsatsen er rettet mod forskning og udvikling inden for: Industriel sikkerhed og driftspålidelighed, forureningsproblemer som følge af energi-, industri- og planteproduktion samt nukleare sikkerheds- og beredskabsforhold.

Materialeforskningen sigter mod udviklingen af nye materialer med lovende perspektiver for den industrielle udvikling. Indsatsen er rettet mod: Materialers atomare egenskaber og struktur, nye materialer som teknisk keramik, metalpulvere, plast- og metalkompositter, og endelig avancerede målemetoder baseret på optisk signalbehandling.

Forskningen er organiseret i otte videnskabelige afdelinger for: Faststoffysik, Forbrænding, Materialer, Meteorologi og Vindenergi, Miljø, Nuklear Sikkerhed, Optik og Fluid Dynamik samt Systemanalyse.

Budgettet for 1991 udgør 384 millioner kroner, hvoraf 40% er indtægter fra programforskning og kontraktvirksomhed, mens resten dækkes af finanslovbevillingen.

Rekvireres fra
Risø Bibliotek
Forskningscenter Risø
Postboks 49, 4000 Roskilde
Telefon 42 37 12 12, lokal 2268/2269
Telex 43116, Telefax 46 75 56 27

ISBN 87-550-1746-0
ISSN 0418-6435